

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Кафедра «Электрические станции и электроэнергетические системы»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



подпись

Коваленко И.В.

инициалы, фамилия

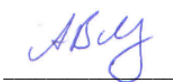
«21» июня 2016 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.02.03

ОПТИМИЗАЦИЯ ОТЫСКАНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА  
ЗЕМЛЮ В СЕТИ 10 КВ ПС ЕМЕЛЬЯНОВО

Руководитель




подпись, дата

\_\_\_\_\_  
должность, ученая степень

Малеев А. В.

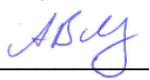
Выпускник



подпись, дата

Любезных Д.А

Нормоконтролер



подпись, дата

Малеев А.В.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Кафедра «Электрические сети и электроэнергетические системы»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



подпись

Коваленко И.В.

инициалы, фамилия

« 5 » апреля 2016 г.

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
В ФОРМАТЕ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студенту Любезных Дмитрию Александровичу

Группа ФЭ12-11Б Направление (специальность) 13.03.02.03

Электроэнергетика и электротехника, Релейная защита и автоматизация  
электроэнергетических систем (профиль)

Тема выпускной квалификационной работы

«Оптимизация отыскания однофазных замыканий в сети 10 кВ ПС  
Емельяново»

Утверждена приказом по университету № 4816/с от 7.04.2016г.

Руководитель ВКР А. В. Малеев

---

должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: Поопорная схема ВЛ 10 кВ ф.45-5 паспортные  
данные трансформаторов, длины и марки проводов ВЛ 10 кВ, ведомость  
контрольных замеров по ПС №45 «Емельяново»

Электромеханическое оборудование:  
трансформаторы - тип ТДТН, мощность 25 тыс.кВА

Перечень рассматриваемых вопросов (разделов ВКР). Общие сведения о се-  
тях с изолированной нейтралью, способы выявления факта наличия однофаз-  
ных замыканий на землю, составление схемы замещения прямой (обратной) и  
нулевой последовательностей, моделирование ИПВЛ и системы ОМП в про-  
граммном комплексе Matlab.

Перечень графического или иллюстративного материала с указанием основ-  
ных чертежей.

Чертеж 1 - Поопорная схема электрической сети

Чертеж 2 - Схема замещения

Чертеж 3 - Структурная схема ИПВЛ

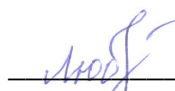
Руководитель ВКР



подпись

Малеев А. В.

Задание принял к исполнению



подпись

Любезных Д.А

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Оптимизация отыскания однофазных замыканий в сети 10 кВ ПС Емельяново» содержит 57 страниц текстового документа, 15 использованных источников, 3 листа графического материала.

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ЗАЩИТА, ИНДИКАТОРЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ.

Объект анализа – ПС №45 «Емельяново»

Цели анализа:

- исследование проблемы отыскания однофазных замыканий на землю;
- исследование способов выявления однофазных замыканий на землю в сети с изолированной нейтралью;
- Моделирование и проверка в программном комплексе Matlab устройства шунтирования замыкания (УШЗ) и индикаторов повреждения воздушных линий ИПВЛ;

В процессе исследования было выбрано основное оборудование: индикаторы повреждения воздушных линий (ИПВЛ), устройство шунтирования замыкания (УШЗ), работа которого была проверена на программном комплексе в Matlab.

## Содержание

Введение.....	5
1 Общие сведения о сетях с изолированной нейтралью.....	7
2 Признаки работы сети с замыканием на землю.....	8
3. Ликвидация аварий при замыкании на землю.....	10
4. Трансформатор тока нулевой последовательности.....	14
5. Метод симметричных составляющих токов и напряжений.....	17
6. Фильтры напряжения нулевой последовательности.....	22
7. Параметры схемы замещения.....	26
7.1 Моделирование силового трансформатора.....	26
7.2 Моделирование трехфазной линии электропередачи с сосредоточенными параметрами.....	31
7.3 Моделирование трехфазной последовательной нагрузки 3 Phase Series RLC Load.....	34
7.4 Моделирование короткозамыкателя.....	39
8. Индикаторы повреждения линий электропередачи 6-35кВ.....	40
9. Система определения места повреждения ВЛ 6-35кВ.....	44
10. Моделирование устройства шунтирования замыкания УШЗ.....	46
11. Моделирование индикатора повреждения воздушной линии.....	52
Список использованных источников.....	56

## Введение

### Актуальность проблемы

Электроснабжение потребителей в Емельяновском районе осуществляется в основном по воздушным сетям напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью.

В настоящее время из-за хронического отсутствия средств на своевременный и качественный ремонт данных сетей их техническое состояние постоянно ухудшается. Статистические данные об аварийности в этих сетях указывают на то, что наиболее частым видом повреждений, в среднем 60-70 % всех случаев, являются однофазные замыкания на землю (ЗНЗ).

Так как данный вид замыканий не является нарушением нормального режима, отчётность таких замыканий на предприятии не ведётся.

Однако имеется статистика об междуфазных замыканиях, по которым можно косвенно оценить изношенность линий.

Таблица 1.1 – Статистика отключения линий п/ст Емельяново с 2015 по 2016 г

$U_{\text{ном.}}$ кВ	Состояние нейтрали	Общее количество отключений	Причина
35	Изолированная	1	2-х фазное КЗ
10	Изолированная	29	2-х фазное КЗ

Причиной частых отключений в сети 10 кВ является то, что однофазное замыкание не требуется немедленно отключать.

## **1 Общие сведения о сетях с изолированной нейтралью**

Режим изолированной нейтрали используют при напряжении 6 - 35 кВ. Такой режим нейтрали рекомендован ПУЭ во всех электроустановках. [1]

Причина широкого распространения режима работы с изолированной нейтралью заключается в том, что в такой сети замыкание одной фазы на землю не является КЗ (значения токов однофазного замыкания на землю (033) невелики, они не превышают 20 - 30 А). Поэтому сети классов напряжения 6 – 35 кВ называют сетями с малым током замыкания на землю.

Сети с изолированной нейтралью может эксплуатироваться до нескольких часов с замыканием фазы на землю. Ток замыкания на землю получается во много раз меньше, чем ток междуфазных КЗ. Это главное достоинство сети с изолированной нейтралью. В такой сети обычно нет необходимости в применении специальных быстродействующих защит от замыкания на землю, т. е. не требуются дополнительные затраты на выполнение и эксплуатацию защиты.

Правила технической эксплуатации (ПТЭ) электрических станций и сетей Российской Федерации допускают работу воздушных и кабельных линий с замыканием на землю при изолированной нейтрали сети до устранения повреждения. При этом к отысканию места повреждения следует приступать немедленно и ликвидировать повреждение в кратчайший срок из-за опасности поражения током людей и животных.

Фазные напряжения в сети с изолированной нейтралью при замыканиях на землю могут превышать линейные напряжения, что обусловлено возникновением так называемой перемежающейся электрической дуги. Термин «перемежающаяся» означает, что электрическая дуга горит неустойчиво: загорается на некоторое время, затем гаснет и, спустя интервал времени, загорается вновь.

Но определить на каком из присоединений произошло повреждение, невозможно. Поэтому приходится их поочередно отключать. Поочередное отключение производится оперативным персоналом. При отключении поврежденного присоединения напряжение нулевой последовательности в сети снижается до фоновой уровня. Этот признак и используется при поиске повреждения.

## 2. Признаки работы сети с замыканием «на землю».

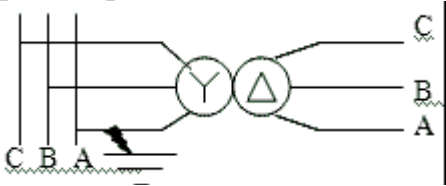
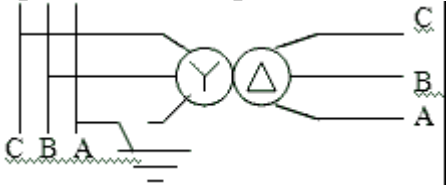
В сетях 3 – 35кВ замыкание «на землю», получившее название «земля в сети», является наиболее частым видом повреждения и составляет 70 – 75 % всех случаев повреждений. Причинами возникновения замыкания «на землю» могут быть :

- электрические или механические повреждения изоляции;
- загрязнение или увлажнение изоляции;
- обрыв проводов или тросов;
- падение посторонних предметов на токоведущие части.

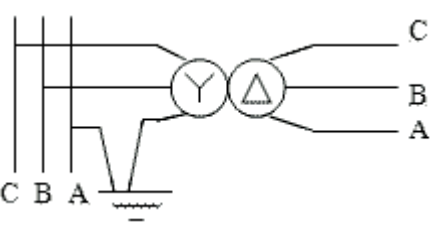
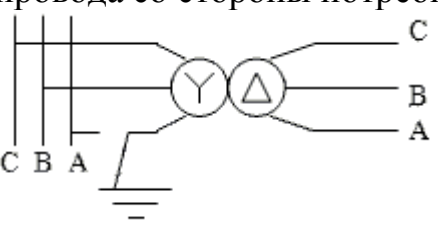
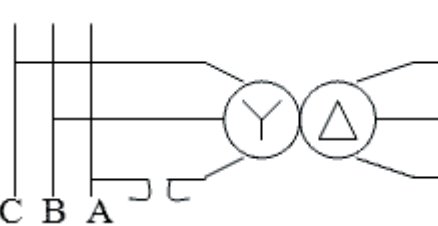
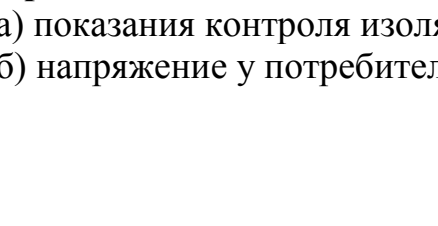
В зависимости от характера повреждений, «земля» в сети может быть: полной или частичной, устойчивой или перемежающейся.

Признаком работы сети в режиме замыкания «на землю» свидетельствует повышение фазного напряжения на неповрежденных фазах и снижение на поврежденной фазе по отношению к земле [8].

### *Показания приборов при однофазных повреждениях:*

Вид однофазного повреждения	Показания прибора	
1	2	3
Замыкание фазы на «землю» без обрыва провода 	a	Полная «земля». $U_a = 0$ $U_b, U_c$ – полные линейные напряжения
	б	Нормальное, симметричное
Трансформатор потребителя Замыкание на «землю» оборванного провода со стороны питания 	a	Полная «земля». $U_a = 0$ $U_b, U_c$ – полные линейные напряжения
	б	Несимметричное, причем $U_{ac}$ наименьшее. Работа электродвигателей невозможна.
Замыкание на «землю» обоих концов оборванного провода С	a	Полная «земля». $U_a = 0$ $U_b, U_c$ – полные линейные напряжения



 <p>Трансформатор потребителя</p>	б	<p>Из-за изменения контакта между концами оборванного провода и землей колеблется.</p> <p>Работа электродвигателей невозможна.</p>
<p>Замыкание на «землю» оборванного провода со стороны потребителя</p>  <p>Трансформатор потребителя</p>	а	<p>Перекус показаний вольтметров контроля изоляции – «неполная земля». Вольтметр поврежденной фазы <math>U_a</math> дает большее показание, чем на остальных фазах <math>U_b</math>, <math>U_c</math>.</p>
<p>Обрыв провода без замыкания на «землю»</p>  <p>Трансформатор потребителя</p>	б	<p>Несимметричное. <math>U_{ac}</math> – наименьшее.</p> <p>Работа эл.двигателей невозможна.</p>
<p>Обрыв провода без замыкания на «землю»</p>  <p>Трансформатор потребителя</p>	а	<p>Перекус в показаниях приборов контроля изоляции – «неполная земля».</p> <p>Вольтметр поврежденной фазы <math>U_a</math> дает большее показание, чем на остальных фазах <math>U_b</math>, <math>U_c</math>.</p>
	б	<p>Несимметричное. <math>U_{ac}</math> – наименьшее.</p> <p>Работа эл.двигателей невозможна.</p>

**Примечание:**

- а) показания контроля изоляции на питающем конце;
- б) напряжение у потребителя.

### **3. Ликвидация аварий при замыкании на землю**

3.1 Замыкание на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостных токов [9].

3.1.1. При возникновении замыкания на землю определяется место повреждения и устраняется в кратчайший срок. Задержка в определении места повреждения увеличивает вероятность перехода однофазного замыкания в двойное замыкание на землю.

Согласно правилам технической эксплуатации при замыкании на землю в сети генераторного напряжения турбогенераторы мощностью 150 МВт и более, гидрогенераторы и СК мощностью соответственно 50 МВт и 50 МВАр и более автоматически отключаются от сети, а при отказе защит немедленно разгружаются и отключаются от сети.

Работа генераторов и СК меньшей мощности при замыкании на землю с токами замыкания в сети не более 5 А допускается в течение не более 2 ч.

Если известно, что место замыкания не в обмотках генератора, а в сети, то при необходимости принимается решение о работе генератора, СК с замыканием в сети в течение 6 ч.

В электросетях, имеющих заземляющие дугогасящие реакторы, время работы с замыканием на землю может также определяться и условиями работы реакторов (температурой верхних слоев масла).

3.1.2. Появление замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью определяется по приборам контроля изоляции, подключенным к трансформаторам напряжения шин РУ, приборам, действующим на основании измерений токов в цепи заземляющих дугогасящих реакторов, высших гармонических составляющих тока и др.

При металлическом замыкании на землю одной из фаз показания прибора, контролирующего изоляцию этой фазы, будут равны нулю, а показания приборов двух других фаз возрастут в 1,73 раза. При неполном замыкании на землю, т. е. при замыкании через сопротивление, значение тока по показаниям прибора, контролирующего изоляцию поврежденной фазы, уменьшается, а двух других фаз увеличивается. При перемежающихся замыканиях на землю отклонения в показаниях приборов то уменьшаются, то увеличиваются.

Постоянно контролируются операции и режимы, при которых приборы контроля изоляции дают разные по фазам показания: при переключениях в сети (работе АВР), связанных с подключением к компенсированному участку сети некомпенсированного (недокомпенсированного) участка;

в случаях, когда емкости фаз по отношению к земле значительно отличаются одна от другой;

в сетях с резонансной настройкой заземляющих дугогасящих реакторов при заземлении в соседней сети, электрически не связанной с первой, при наличии линий в двухцепном исполнении, каждая из которых включена в соответст-

вующую сеть; при не отключении одной фазы радиальной линии, включенной на отдельный трансформатор; в случае обрыва фазы на стороне высокого напряжения силового трансформатора, выполненного по схеме «звезда-треугольник». При этом приборы контроля изоляции на стороне низкого напряжения будут иметь искаженные показания: на одной фазе напряжение будет вдвое больше, чем на двух других; при перегорании плавких предохранителей на стороне высокого или низкого напряжения в случае использования в качестве устройств сигнализации реле минимального напряжения.

3.1.3. Если появление замыкания на землю совпало по времени с включением выключателя какого-либо присоединения, немедленно отключается этот выключатель и контролируется исчезновение замыкания на землю. Автоматическое отключение какой-либо линии с успешным АПВ и появление замыкания на землю в этот момент в большинстве случаев являются признаком наличия такого замыкания на этой линии.

3.1.4. Отыскание замыкания на землю в замкнутой сети, если нет специальных приборов, указывающих, на какой линии имеется замыкание на землю, производится, как правило, методом последовательного деления:

а) замкнутая сеть делится на две части, электрически не связанные между собой: по приборам контроля изоляции определяется часть, в которой замыкание на землю сохранилось, затем обе части электросети замыкаются на параллельную работу;

б) часть электросети с замыканием на землю делится снова на две части, электрически не связанные между собой;

в) деление сети производится до тех пор, пока заземление не будет найдено на ограниченном участке, т. е. на участке, состоящем из шин питающей подстанции (электростанции) с отходящими от них параллельными и одиночными тупиковыми линиями. Затем параллельные тупиковые линии поочередно отключаются с двух сторон: если заземление не пропадает, то производится осмотр РУ питающей подстанции и тупиковых подстанций;

г) если заземление в РУ подстанций не обнаружено, то по договоренности с потребителями производят кратковременное (1-2 с) поочередное погашение тупиковых подстанций, следя за показаниями приборов контроля изоляции. Исчезновение замыкания на землю показывает, что данная тупиковая линия имеет повреждение;

д) при невозможности получить согласие потребителей на обесточивание и при наличии на электростанции (подстанции) свободной СШ, нескольких трансформаторов и ШСВ поврежденный элемент выявляется переводом на резервную СШ трансформатора и поочередным переводом на эту СШ тупиковых линий с последующим отключением после каждого перевода ШСВ по показаниям приборов контроля изоляции;

е) если выполнение операций согласно пп. 5.1.4г и 5.1.4д настоящей Инструкции не представляется возможным, то, предупредив абонента, временно (на 1 -2 с) отключается тупиковая линия, если от нее не питаются потребители первой категории; исчезновение замыкания на землю показывает,

что данная линия имеет повреждение.

Кратковременное (на 1 -2 с) отключение потребителя первой категории производится только после получения согласия абонента.

3.1.5. Перед делением сети на части проверяется наличие источников питания в каждой части, возможность перегрузок транзитных элементов сети, ожидаемые уровни напряжения и значение настройки дугогасящих заземляющих реакторов в каждой отделяемой части.

Метод последовательного деления сети на части разрабатывается индивидуально для каждой сети, электростанции и подстанции. Указания по делению на части приводятся в инструкциях. Там же указываются и примерные точки деления сети.

Деление сети производится кратковременным отключением выключателя с последующим его включением.

В зависимости от схемы сети, наличия дугогасящих заземляющих реакторов и источников питания при делении сети на части не замыкаются на параллельную работу разделенные части.

Если поочередным отключением линий заземление не найдено, место заземления выявляется осмотром РУ электростанций (подстанций).

3.1.6. Последовательность действий при появлении замыкания на землю в сети генераторного напряжения (6-10 кВ) электростанций:

а) осматриваются панели защит от замыканий на землю, если таковые имеются, или используется стационарный (переносный) прибор по отысканию однофазных замыканий и сообщается о появлении замыканий на землю и результатах осмотра защит или о показаниях прибора;

б) если на основании анализа работы защиты или показаний прибора установлено наличие замыкания на землю на какой-либо линии, то сообщается о необходимости перевода нагрузки с этой линии на другую, но не позже чем через 2 ч (в крайнем случае через 6 ч) после возникновения замыкания на землю.

После перевода нагрузки на неповрежденную линию поврежденная линия с согласия абонента отключается и выводится в ремонт.

При задержке в переводе или снятии нагрузки с линии, отходящей от РУ с секционированными шинами, секция (СШ) с заземлившейся линией электрически отделяется от остальной части электростанции. При отделении не перегружается оборудование и не понижается напряжение; на отделяемой секции имеется источник питания (трансформатор) и соответственно настроенный дугогасящий заземляющий реактор. После проведения операции осматривается присоединение заземлившейся линии и РУ электрически отделенной секции.

Если возможно (по режиму работы и схеме электростанции), линия с замыканием на землю переводится на питание от резервной СШ через выделенный трансформатор.

При отсутствии такой возможности впредь до отключения заземлившейся линии переводится питание СН электростанций, питающихся от секции с заземлившейся линией, на резервный источник питания;

в) если появилось замыкание на землю в сети генераторного напряжения при

отсутствии защит от замыкания на землю на линиях и прибора по отысканию однофазных замыканий на землю при секционированных шинах, путем разделения секций определяется, на какой из них произошло замыкание на землю. Затем переводится питание СН электростанции с заземлившейся секции (СШ) на резервный источник питания.

Секция (СШ), на которой появилось замыкание на землю, осматривается, при этом обращается внимание на внешнее состояние аппаратуры, треск, ненормальное гудение оборудования, разряды (перекрытия) на кабельных воронках. Если заземление обнаружено на шинах, спусках к шинным разъединителям и т.д., переходят на резервную СШ и отключают поврежденную.

Если заземления в РУ не обнаружено, приступают к последовательному переводу линий на резервную СШ с включенным на нее трансформатором. При этом после каждого перевода линии на резервную СШ отключают ШСВ. При отсутствии резервной СШ путем поочередного кратковременного (1-2 с) отключения линий определяется поврежденная линия.

Такое отключение не рассматривается как недоотпуск электроэнергии потребителю. Этот метод эффективен только при радиальной сети.

После обнаружения поврежденной линии, если нагрузка этой линии не может быть немедленно снята без ущерба для потребителей, поврежденная линия по возможности изолируется от основной сети.

При этом учитывается, что замыкание на землю на кабельных линиях или обмотках высоковольтных двигателей СН или у потребителя через некоторое время перейдет в междуфазное, поэтому действия проводятся без выдержки времени.

Если замыкание на землю обнаружено на присоединении генератора, последний разгружается и отключается;

г) в случае обнаружения замыкания на землю между выключателем и губками шинных разъединителей присоединение переводится на резервную СШ с последующим отключением собственного, а затем шиносоединительного выключателя.

#### 4. Трансформатор тока нулевой последовательности

Принцип работы ТНП заключается в геометрическом суммировании магнитных потоков, образованных первичными токами трех фаз. При этом результирующая магнитодвижущая сила первичной обмотки пропорциональна сумме токов трех фаз [4].

Первичной обмоткой данных трансформаторов тока являются токопроводы трех фаз защищаемого присоединения (кабеля). Вторичная обмотка их располагается на ферромагнитном сердечнике, имеющем тороидальную (кольцевую), прямоугольную или квадратную формы. Сердечник (ленточный или шихтованный) изготавливается из стали, феррита или пермаллоя. В нормальном режиме геометрическая сумма первичных токов (и соответствующих магнитных потоков) равна нулю, и ЭДС во вторичной обмотке отсутствует. При ОЗЗ образуется ток нулевой последовательности, и в сердечнике ТНП появляется результирующий поток  $\Phi_{рез}$ , который во вторичной обмотке наводит ЭДС, пропорциональную первичному току  $3I_0$ . Под воздействием наведенной ЭДС вторичный ток ТНП поступает в измерительный орган защиты.

Вследствие неидеальности конструкции ТНП и неточности его расположения на кабеле во вторичной обмотке реального ТНП может наводиться ЭДС и в нормальных условиях (даже при равенстве первичных токов и при отсутствии  $3I_0$ ).

Неодинаковость потоков рассеяния для разных фаз приводит к появлению несимметрии потоков, замыкающихся по сердечнику и, соответственно, к появлению ЭДС во вторичной обмотке ТНП при отсутствии токов нулевой последовательности в защищаемом кабеле.

При отсутствии тока нулевой последовательности во вторичной цепи ТНП образуется ток небаланса, который зависит в данном режиме от наличия симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей данного присоединения.

ЭДС и токи небаланса во вторичных обмотках ТНП могут появляться также вследствие влияния различных наводок, источниками которых могут быть: внешние магнитные поля (от близко расположенных токоведущих частей), блуждающие и сварочные токи и др. Небаланс может возникать при коммутационных переключениях в сети, при отключениях трехфазных КЗ, связанных с землей, и т. д. Действие перечисленных факторов обуславливает появление в нагрузке (реле) вторичной обмотки ТНП ЭДС и тока небаланса.

По броне и металлической оболочке кабеля могут проходить токи утечки  $I_{ут}$ , которые не связаны с замыканием на данном кабеле. Они вызывают ложное срабатывание защиты. Для исключения трансформации токов брони участок кабеля от ТНП до муфты (и сама муфта) изолируется от земли. При

этом заземляющий проводник, соединяющий оболочку (броню) и муфту с заземлителем, пропускается через окно магнитопровода в направлении конца кабеля. При таком способе заземления кабеля (рисунок 1) токи утечки, проходящие через ТНП в прямом и обратном направлениях, создают два одинаковых по величине, но противоположных по знаку магнитных потока. Поэтому ток брони не трансформируется во вторичную обмотку ТНП.

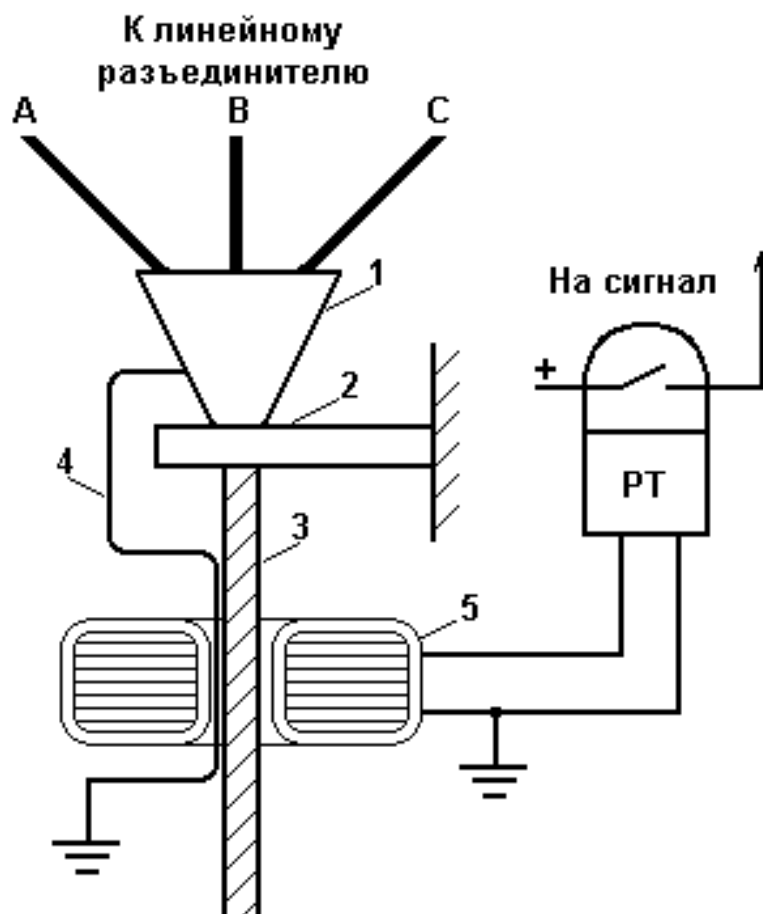


Рисунок 4.1 – Токовая защита от замыканий на землю.

- 1 – кабельная воронка
- 2 – изолирующая опора
- 3 – кабель
- 4 – заземляющий проводник
- 5 – трансформатор тока нулевой последовательности (ТНП)
- 6 – токовое реле

В этих защитах используются токовые реле специального исполнения.

Если кабельную воронку заземлить выше трансформатора тока, защита будет срабатывать от наведенных токов, которые могут появляться при выполнении сварочных работ, замыканиях на землю линий с глухозаземленной нейтралью вблизи трассы прохождения кабеля и в некоторых других случаях. Для исключения этого заземляющий проводник кабельной воронки

пропускается через окно ТНП и подключается к заземляющему контуру ниже его, а сама воронка изолируется от металлоконструкций.

Но такая схема имеет ограниченное применение. Во-первых, как упоминалось выше, в сети с изолированной нейтралью обеспечить селективность защиты от замыканий на землю сложно. Во-вторых, такая защита применима только при наличии кабельных линий или кабельных вставок. Поэтому большее распространение получила защита, основанная на выявлении напряжения нулевой последовательности. Чаще всего в качестве фильтра нулевой последовательности используются обмотки трансформаторов напряжения, соединенные в разомкнутый треугольник. Для лучшего представления что же такое  $3I_0$  и  $3U_0$  необходимо рассмотреть метод симметричных составляющих.



## 5. Метод симметричных составляющих токов и напряжений.

Токи и напряжения при несимметричных коротких замыканиях (однофазных, двухфазных и др.), как и в других ненормальных режимах, при которых токи и напряжения в фазах, а также углы между фазными токами и напряжениями не равны, весьма трудно рассчитать способами, которые применяются при трехфазных коротких замыканиях и других симметричных режимах.

Прежде чем рассматривать этот метод, напомним, что переменный синусоидальный ток  $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$  характеризуется амплитудой  $I_m$  или действующим значением  $I = I_m / \sqrt{2}$  и фазой (углом) –  $(\omega t + \varphi)$ ,

отсчитываемой от ближайшей предыдущей точки перехода синусоидальной величины через нуль от отрицательных к положительным ее значениям. То же самое относится и к напряжению. В электротехнике часто используется обозначение токов и напряжений в виде векторов, особенно когда рассматриваются суммы и разности токов и напряжений.

Вектор тока (напряжения) характеризуется как своей длиной – амплитудой или действующим значением, так и фазой – направлением. Что данная величина является вектором, условно принято показывать с помощью точки, которая ставится над изображением символа тока или напряжения, т.е.  $\dot{I}$  или  $\dot{U}$ , причем на векторных диаграммах длину вектора обычно принимают равной действующему значению.

Векторная форма записи позволяет упростить выражения и облегчить анализ векторных диаграмм. Например, разность двух переменных токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , которая является геометрической, а не арифметической разностью, в векторной форме записывается в виде  $\dot{I}_1 - \dot{I}_2$ .

Сущность метода симметричных составляющих состоит в том, что любую несимметричную систему векторов можно искусственно заменить суммой трех симметричных трехфазных систем векторов: системы прямой последовательности, системы обратной последовательности и системы нулевой последовательности.

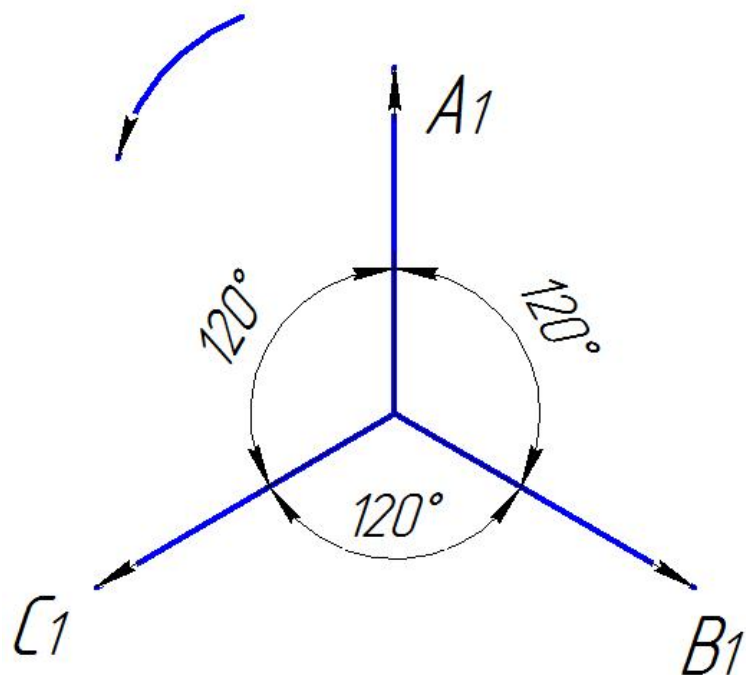


Рисунок 5.1 – Векторная диаграмма прямой последовательности

На рисунке 5.1 приведен рисунок прямой последовательности, векторы фаз сдвинуты друг относительно друга на  $120^\circ$  и при вращении вокруг нулевой точки с условным направлением против часовой стрелки пересекают условную вертикальную ось с чередованием фаз  $A_1, B_1, C_1$ .

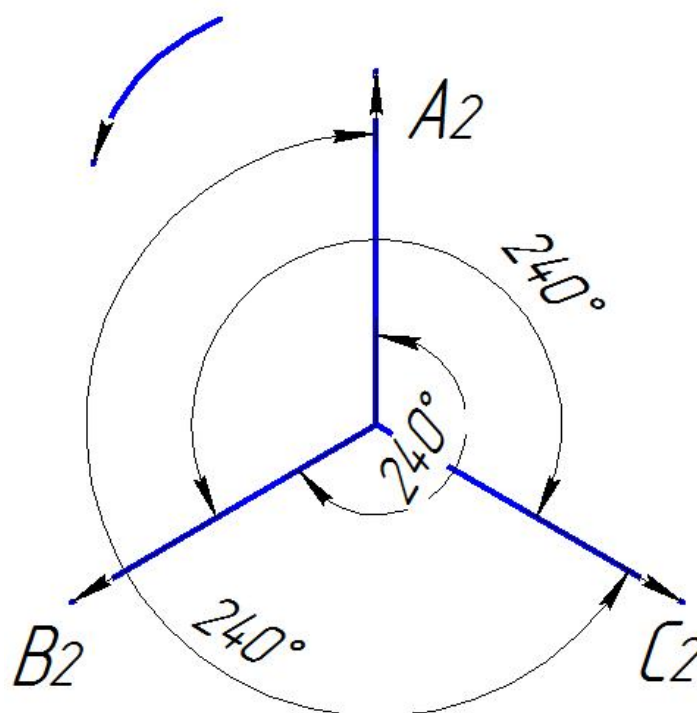


Рис 5.2 – Векторная диаграмма обратной последовательности

В системе обратной последовательности векторы при их том же вращении в том же условном направлении пересекают вертикальную ось с чередованием  $A_2, B_2, C_2$ . Эта последовательность чередования фаз называется обратной, так как она противоположна чередованию  $A_1, B_1, C_1$  в системе прямой последовательности (чередование фаз  $A_2, B_2, C_2$  может быть получено только при «обратном» вращении векторов – по часовой стрелке). Отметим, что в системе обратной последовательности при вращении векторов против часовой стрелки вектор фазы С следует за вектором фазы В, а последний с вектором фазы А со сдвигом, равным  $240^\circ$ .

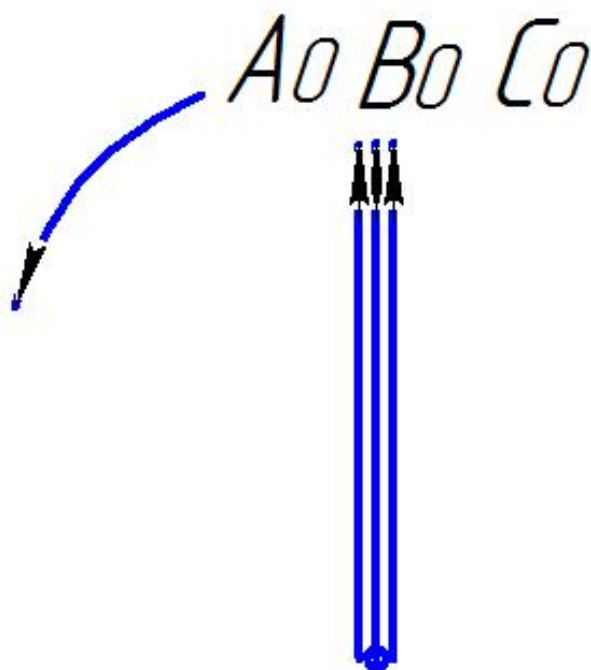


Рис 5.3 – Векторная диаграмма нулевой последовательности

В системе нулевой последовательности векторы трех фаз совпадают по направлению. Последовательность называется нулевой, так как векторы всех трех фаз имеют между собой «нулевой» сдвиг по углу.

Так например, для любой трехфазной системы векторов токов можно записать:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}; \quad (1)$$

$$I_B = I_{B1} + I_{B2} + I_{B0}; \quad (2)$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} + I_{C0}; \quad (3)$$

Где слагаемые с индексами 1, 2, 0 – векторы симметричных систем соответственно прямой, обратной, нулевой последовательностей.

В общем виде следует подчеркнуть, что симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей являются составляющими, искусственно полученными с помощью математики, и, как правило, поэтому не могут быть по отдельности измерены обычными вольтметрами и амперметрами в реальных генераторах, трансформаторах, линиях, двигателях и других элементах трехфазных электрических цепей.

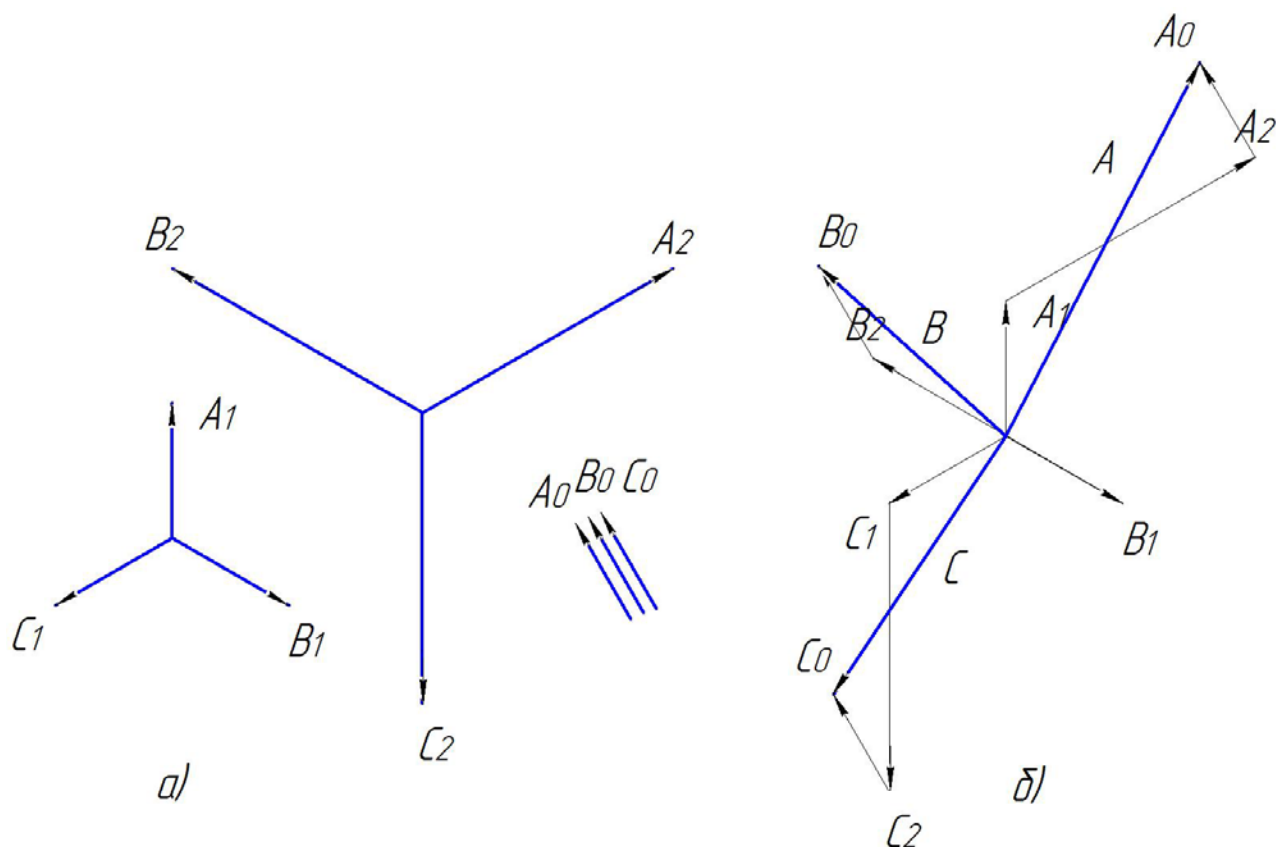


Рисунок 5.4 – Векторные диаграммы, иллюстрирующие разложение несимметричной системы векторов на симметричные составляющие.

а) – симметричные составляющие несимметричной трехфазной системы векторов; б) – пофазное сложение векторов симметричных составляющих.

Только в идеально симметричных трехфазных режимах нагрузки и при идеально симметричных трехфазных коротких замыканиях векторные диаграммы токов и напряжений совпадают с векторными диаграммами прямой последовательности. В этих случаях при искусственном разложении токов и напряжений на симметричные составляющие обратной и нулевой последовательностей равны нулю.

Однако реальные трехфазные цепи, реальные электрические системы даже в нормальных режимах имеют небольшую несимметрию. Поэтому токи и напряжения в реальных цепях или системах практически всегда можно искусственно разложить на симметричные составляющие.

Составляющие обратной последовательности могут быть искусственно получены из значений токов и напряжений при наличии в сети любой несимметрии, в том числе в виде однофазного или двухфазного короткого замыкания, обрыва одной или двух фаз или несимметрии нагрузки. Наибольшие значения ток и напряжения обратной последовательности имеют в месте несимметрии.

Составляющие нулевой последовательности могут быть искусственно получены в некоторых случаях несимметрии, в том числе при однофазных, двухфазных и несимметричных трехфазных замыканиях на землю, а также в случаях обрыва одной или двух фаз или несимметрии нагрузки. При двухфазных коротких замыканиях без земли токи и напряжения нулевой последовательности равны нулю. Наибольшие значения тока и напряжения нулевой последовательности также имеют в месте короткого замыкания, обрыва фаз или другой несимметрии.

## 6. Фильтры напряжения нулевой последовательности

Общий контроль состояния изоляции и выявление однофазных замыканий на землю, как правило, основаны на непрерывном измерении напряжения нулевой последовательности в контролируемой электрической сети [5].

Фильтром напряжения симметричных составляющих называется электрическая схема, состоящая из трансформаторов, активных и реактивных сопротивлений, параметры которых подобраны таким образом, чтобы пропускать в реле, включенное на выходе фильтра, только составляющие одной определенной последовательности и не пропускать других. Следовательно, если на вход фильтра какой-либо последовательности поданы составляющие других последовательностей, напряжение или ток на выходе фильтра от этих последовательностей должны равняться нулю.

В соответствии с определением симметричных составляющих напряжение нулевой последовательности представляется так:

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{E}_{A0} + \dot{E}_{B0} + \dot{E}_{C0}); \quad (4)$$

Здесь  $\dot{E}_{A0}$ ,  $\dot{E}_{B0}$ ,  $\dot{E}_{C0}$  — векторы э.д.с. фаз соответственно А, В, С относительно земли.

Отсюда следует, что в нормальном симметричном режиме, когда потенциал нейтрали сети равен нулю, а модули векторов  $\dot{E}_{A0}$ ,  $\dot{E}_{B0}$ ,  $\dot{E}_{C0}$  равны соответствующим модулям векторов фазных э.д.с., напряжение нулевой последовательности в сети  $\dot{U} = 0$ .

При замыкании фазы С на землю:

$$\dot{E}_{C0} = 0; \quad \dot{E}_{A0} = \dot{E}_{AC}; \quad \dot{E}_{B0} = \dot{E}_{BC}, \quad (5)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \frac{1}{3} \cdot (\dot{E}_{A0} + \dot{E}_{B0} + \dot{E}_{C0}) = \frac{1}{3} \cdot (\dot{E}_{A0} + \dot{E}_{B0}) = \frac{1}{3} \cdot (\dot{E}_{AC} + \dot{E}_{BC}) = -\frac{1}{3} \cdot (3 \cdot \dot{E}_{C0}) = \\ &= -\dot{E}_{C0} \end{aligned} \quad (6)$$

Как видно, при металлическом замыкании фазы на землю модуль напряжения нулевой последовательности равен модулю фазной э.д.с. сети. Следовательно, действующее значение напряжения нулевой последовательности равно действующему значению фазного напряжения.

Для контроля напряжения нулевой последовательности часто используется фильтр напряжения нулевой последовательности, построенный на основе трехфазного ТН, вторичные обмотки которого соединены по схеме разомкнутого треугольника.

Для измерения текущих значений напряжения нулевой последовательности параллельно катушке реле напряжения  $KV$  подключается и вольтметр  $PV$ , как изображено на рисунке 6

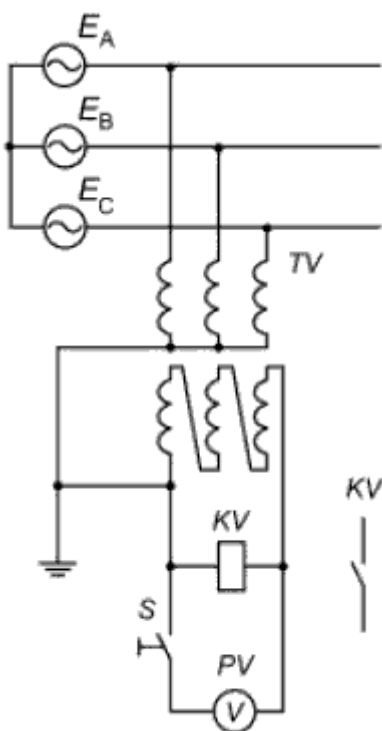


Рисунок 6.1 – Схема контроля напряжения нулевой последовательности с помощью фильтра на основе ТН

Значение напряжения срабатывания (в масштабе первичных величин) выбирается по условию отстройки от максимально возможного напряжения нулевой последовательности, возникающего в контролируемой сети в нормальных для нее режимах:

$$U_{CЗ} > U_{0НР\ MAX}.$$

Здесь  $U_{CЗ}$  — действующее (первичное) значение напряжения срабатывания защиты;  $U_{0НР\ MAX}$  — наибольшее возможное в нормальных режимах действующее (первичное) значение напряжения нулевой последовательности в контролируемой сети.

Значение напряжения  $U_{0НР\ MAX}$  определяется предельно допустимым потенциалом нейтрали ( $U_{N\ MAX}$ ), которое, в свою очередь, обусловлено степенью несимметрии емкостей фаз сети относительно земли:

$$U_{N\ MAX} = (5 — 10) \% U_{\Phi\ НОМ}$$



где  $U_{\text{Ф ном}}$  — номинальное фазное напряжение сети.

Кроме этого, напряжение нулевой последовательности может возникать в сети как проявление замыканий на землю в смежных (внешних) сетях и погрешностей тракта измерений. В результате совместного воздействия этих двух факторов оно может составить 3–5 %  $U_{\text{Ф ном}}$ .

Принимая во внимание возможность появления напряжения нулевой последовательности под действием всех отмеченных факторов, как правило, выбирают:

$$U_{\text{СЗ}} = 0,15 U_{\text{Ф ном}}.$$

Напряжение срабатывания реле определяется с учетом коэффициента трансформации ТН ( $k_{\text{ТН}}$ ):

$$U_{\text{СР}} = U_{\text{СЗ}} / k_{\text{ТН}}.$$

При стандартном значении максимального выходного напряжения трансформатора (фильтра) напряжения нулевой последовательности 100 В напряжение срабатывания реле равно 15 В. Это значение напряжения срабатывания иногда устанавливается без расчетов, так как оно соответствует минимально возможному напряжению срабатывания реле типа РН-53/60Д, используемого в защитах.

Время срабатывания защиты выбирается исходя из требований отстройки от действия основных (селективных) защит от однофазных замыканий на землю и может приниматься в диапазоне от 0,5 до 9 секунд.

## 7. Параметры схемы замещения

### 7.1 Моделирование силового трансформатора

Для создания модели силового трансформатора воспользуемся элементом *Three-phase Transformer (Two Windings)* – трёхфазный двухобмоточный силовой трансформатор. Пиктограмма элемента приведена на рисунке 6.6.

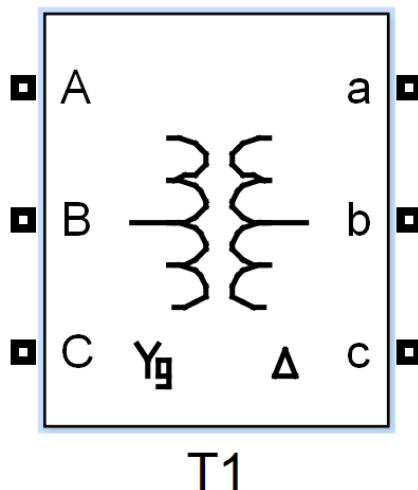


Рисунок 7.1 - Пиктограмма элемента *Three-phase Transformer (Two Windings)*

Диалоговое окно для задания параметров блока представлено на рисунке 7.2

*ABC terminals* [Схема соединения обмоток]. Значение параметра выбирается из списка:

Y – звезда ,

Yn – звезда с нулем,

Yg – звезда, соединенная с «землей»,

D1 – треугольник 1 группа, (сдвиг напряжений на  $30^\circ$  в сторону отставания по сравнению с соединением в звезду);

D11 – треугольник 11 группа, (сдвиг напряжений на  $30^\circ$  в сторону опережения по сравнению с соединением в звезду);

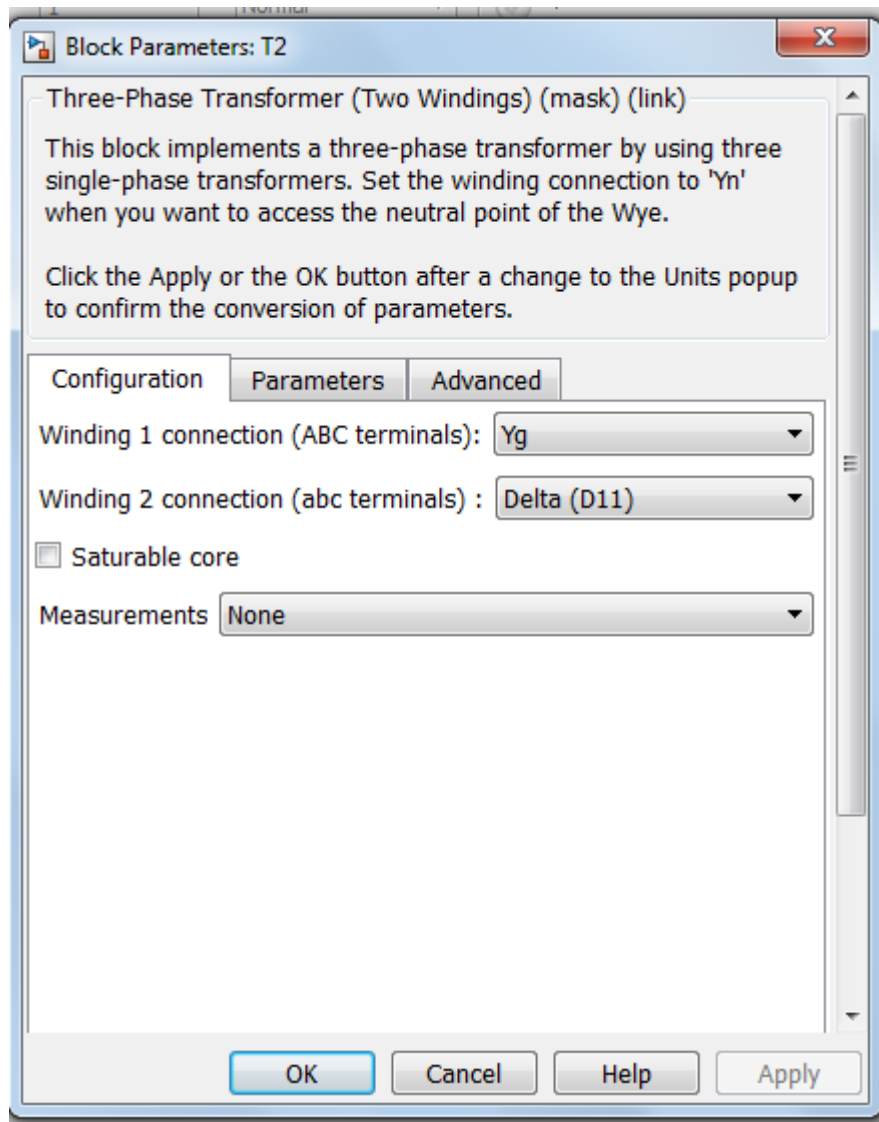


Рисунок 7.2 – Схема соединения обмоток трансформатора

*Winding 1* – обмотка высшего напряжения, соединение  $Y_g$ ;

*Winding 2* – обмотка низшего напряжения, соединение  $\Delta - 11$ ;

*Measurements*: [Измеряемые переменные]. Значения параметра выбираются из списка:

*None* – нет переменных для измерения;

*Winding voltages* – напряжения обмоток;

*Winding currents* – токи обмоток;

*Flux and excitation current ( $I_{mag\_IRm}$ )* – поток и ток холостого хода;

*Flux and magnetization current ( $I_{mag}$ )* – поток и ток намагничивания;

*All Measurements ( $V, I, Flux$ )* – все напряжения, токи и поток.

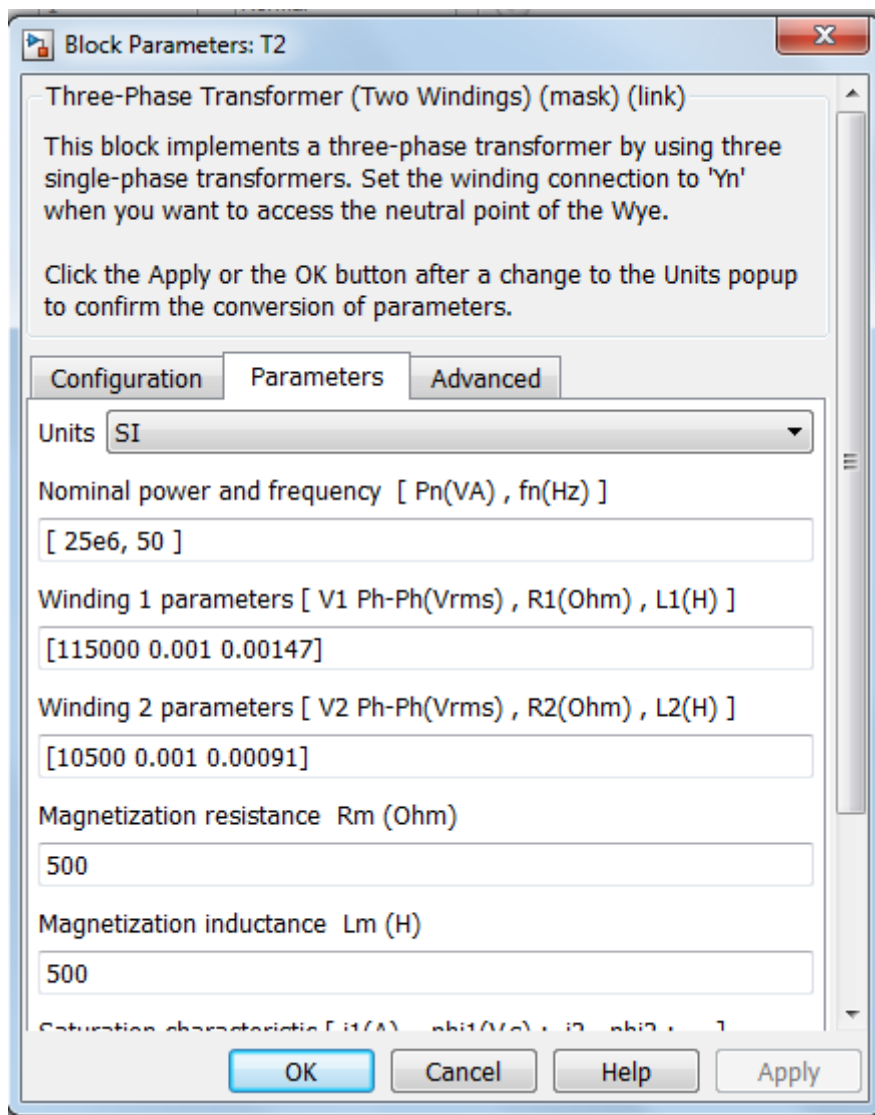


Рисунок 7.3 – Схема замещения трансформатора

Исходные данные, которые нужно указать:

- *Nominal power and frequency [ Pn(VA), fn(Hz) ]* – Номинальная мощность  $[B \cdot A]$  и частота [Гц],
- *Winding 1 parameters [ V1 Ph-Ph(Vrms), R1 (Ohm), L1(H) ]* – Среднее номинальное напряжение обмотки 1 (высшее напряжение) [В], активное омическое сопротивление первичной обмотки [Ом] и индуктивность первичной обмотки [Гн],
- *Winding 2 parameters [ V2 Ph-Ph(Vrms), R2 (Ohm), L2(H) ]* – Среднее номинальное напряжение обмотки 1 (низшее напряжение) [В], активное омическое сопротивление вторичной обмотки [Ом] и индуктивность вторичной обмотки [Гн].
- *Magnetization resistance Rm (pu):* [Сопротивление цепи намагничивания (о.е.)],

- *Magnetization inductance  $L_m$  (pu)*: [Индуктивность цепи намагничивания (о.е.)].

Индекс «е» указывает на то, что число возведено в степень;

Исходные параметры трансформатора:

$$\begin{aligned} S_{\text{Тном}} &= 25000 \text{ кВА}, \\ f_{\text{ном}} &= 50 \text{ Гц}, \\ U_{\text{срном}}^B &= 115 \text{ кВ}, \\ U_{\text{срном}}^H &= 10,5 \text{ кВ} \end{aligned}$$

Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток, Ом:

$$R_{\text{общ}} = \frac{\Delta P_K \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{Тном}}^2}, \quad (7)$$

Где  $\Delta P_K$  – потери короткого замыкания, кВт;

$U_{\text{ср.ном}}$  - среднее номинальное напряжение той ступени трансформации, на которую рассматривается установка защиты, кВ;

$S_{\text{Тном}}$  - номинальная паспортная мощность трансформатора, МВА;

$$R_{\text{общ}} = \frac{145 \cdot 10^3 \cdot 10,5^2 \cdot 10^6}{25^2 \cdot 10^{12}} = 0,01,$$

$$R1 = R2 = 0,5 \cdot R_{\text{общ}} \quad (8)$$

$$R1 = R2 = 0,5 \cdot 0,01 = 0,005$$

Напряжения короткого замыкания для каждой из сторон, %:

$$u_{\text{кз}}^B = 0,5 \cdot (u_{\text{кз}}^{B-C} + u_{\text{кз}}^{B-H} - u_{\text{кз}}^{C-H}) \quad (9)$$

$$u_{\text{кз}}^C = 0,5 \cdot (u_{\text{кз}}^{B-C} - u_{\text{кз}}^{B-H} + u_{\text{кз}}^{C-H}) \quad (10)$$

$$u_{\text{кз}}^H = 0,5 \cdot (-u_{\text{кз}}^{B-C} + u_{\text{кз}}^{B-H} + u_{\text{кз}}^{C-H}) \quad (11)$$

Где  $u_{\text{кз}}^{B-C}$ ,  $u_{\text{кз}}^{B-H}$ ,  $u_{\text{кз}}^{C-H}$  - паспортные данные напряжения короткого замыкания для соответствующей пары обмоток, %;

$$u_{\text{кз}}^B = 0,5 \cdot (10,5 + 17 - 6,5) = 10,5,$$

$$u_{кз}^C = 0,5 \cdot (10,5 - 17 + 6,5) = 0,$$

$$u_{кз}^H = 0,5 \cdot (-10,5 + 17 + 6,5) = 6,5,$$

Индуктивные сопротивления высшей и низшей обмотки, Ом:

$$x_T^B = \frac{u_{кз}^B \cdot U_{ср.ном}^2}{100\% \cdot S_{Тном}}, \quad (12)$$

$$x_T^H = \frac{u_{кз}^H \cdot U_{ср.ном}^2}{100\% \cdot S_{Тном}}, \quad (13)$$

Где  $U_{ср.ном}$  - среднее номинальное напряжение той ступени трансформации, на которую рассматривается установка защиты, кВ;

$S_{Тном}$  - номинальная паспортная мощность трансформатора, МВА;

$u_{кз}^B, u_{кз}^H$  - напряжения короткого замыкания высшей и низшей обмоток, %

$$x_T^B = \frac{10,5\% \cdot 10,5^2 \cdot 10^6}{100\% \cdot 25 \cdot 10^6} = 0,463,$$

$$x_T^H = \frac{6,5\% \cdot 10,5^2 \cdot 10^6}{100\% \cdot 25 \cdot 10^6} = 0,287,$$

Индуктивность высшей и низшей обмоток, Гн:

$$L_1 = \frac{x_T^B}{\omega} = \frac{x_T^B}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (14)$$

$$L_2 = \frac{x_T^H}{\omega} = \frac{x_T^H}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (15)$$

Где  $\omega$  - угловая частота вращения, рад/с;

$f$  - промышленная частота 50 Гц;

$$L_1 = \frac{0,463}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00147$$

$$L_2 = \frac{0,287}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00091$$

## 7.2 Моделирование трехфазной линии электропередачи с сосредоточенными параметрами

Блок 3 – *Phase PI Section Line* моделирует трехфазную линию электропередачи с сосредоточенными параметрами с учетом взаимной индуктивности фаз линии. Модель состоит из одной секции. Для создания модели из нескольких секций необходимо последовательно включить нужное количество блоков.

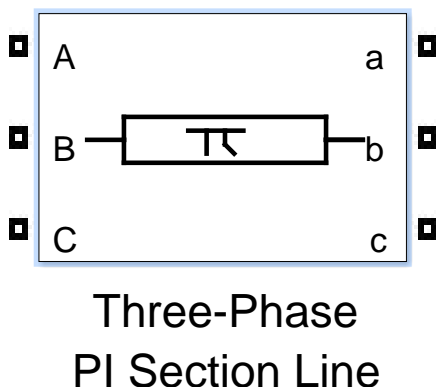


Рисунок 7.4 – Пиктограмма элемента *Three-phase PI Section Line*

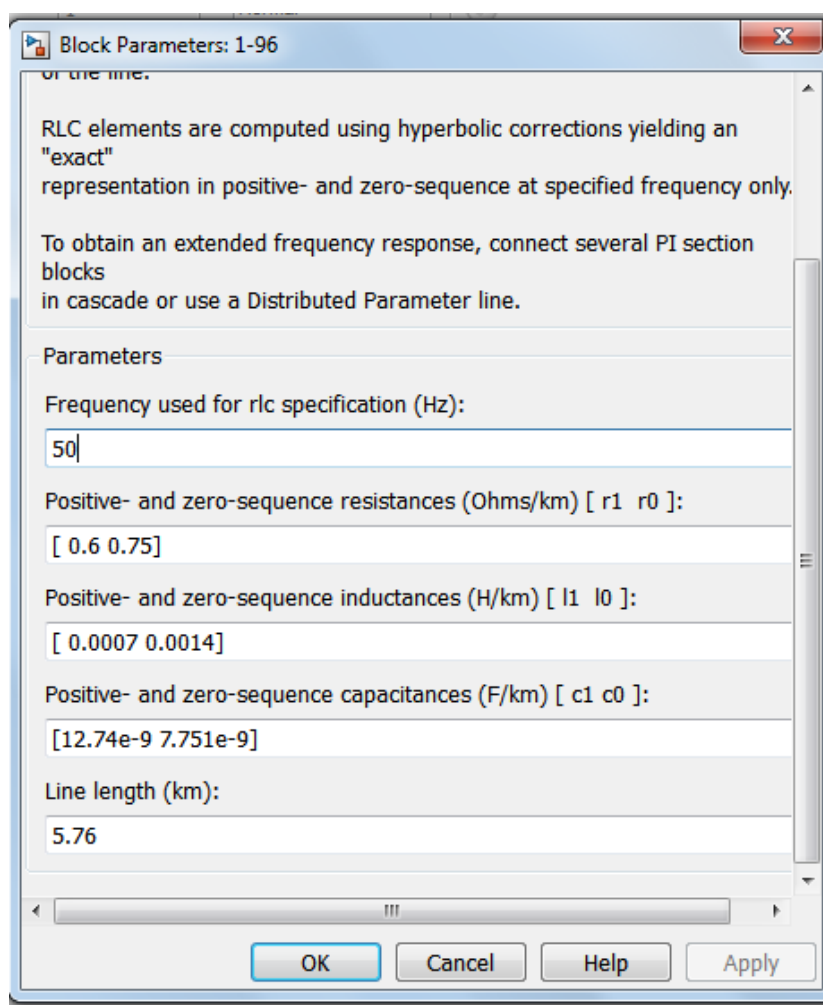


Рисунок 7.5 – Линия электропередачи с сосредоточенными параметрами

Исходные данные, которые нужно указать:

- *Positive- and zero-resistances (Ohms/km) [r1 r0]* – удельные сопротивления прямой и нулевой последовательности на 1 км длины, Ом/км;
- *Positive- and zero-inductances (H/km) [l1 l0]* – удельное значение индуктивности прямой и нулевой последовательности на 1 км длины, Гн/км;
- Line length (km) – длина линии, км;
- *Frequency used for R L C specification (Hz):* [Частота работы линии (Гц)]. Частота, для которой определяются параметры линии R, L и C.

На стороне 10 кВ используется марка проводов АС 50.

Активное сопротивление прямой последовательности, Ом/км:

$$r_1 = \frac{\rho}{F} \quad (16)$$

Где  $\rho = 30$  – удельная плотность алюминия,  $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{км}}$ ;

$F$  – сечение провода,  $\text{мм}^2$

$$r_1 = \frac{30}{50} = 0,6$$

$$r_0 = r_1 + 0,15 = 0,75$$

Расчет индуктивности прямой и нулевой последовательности

Найдем радиус провода,  $\text{мм}^2$ :

$$r_{\text{пр}} = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad (17)$$

$$r_{\text{пр}} = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{50}{3,14}} = 4,4,$$

Индуктивное удельное сопротивление прямой последовательности, Ом/км;

$$x_1 = 0,144 \cdot \log \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} + \mu \quad (18)$$

Здесь  $D_{\text{ср}}$  – среднее междуфазное расстояние (для 10 кВ –  $1 \div 1,5$  м) [15];

$\mu$  – магнитная проницаемость воздуха;

$$x_1 = 0,144 \cdot \log \frac{1}{0,0044} + 0,016 = 0,355$$

Индуктивность удельная прямой последовательности, Гн/км;



$$L_1 = \frac{x_1}{\omega} = \frac{x_1}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (19)$$

$$L_1 = \frac{0,355}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0011$$

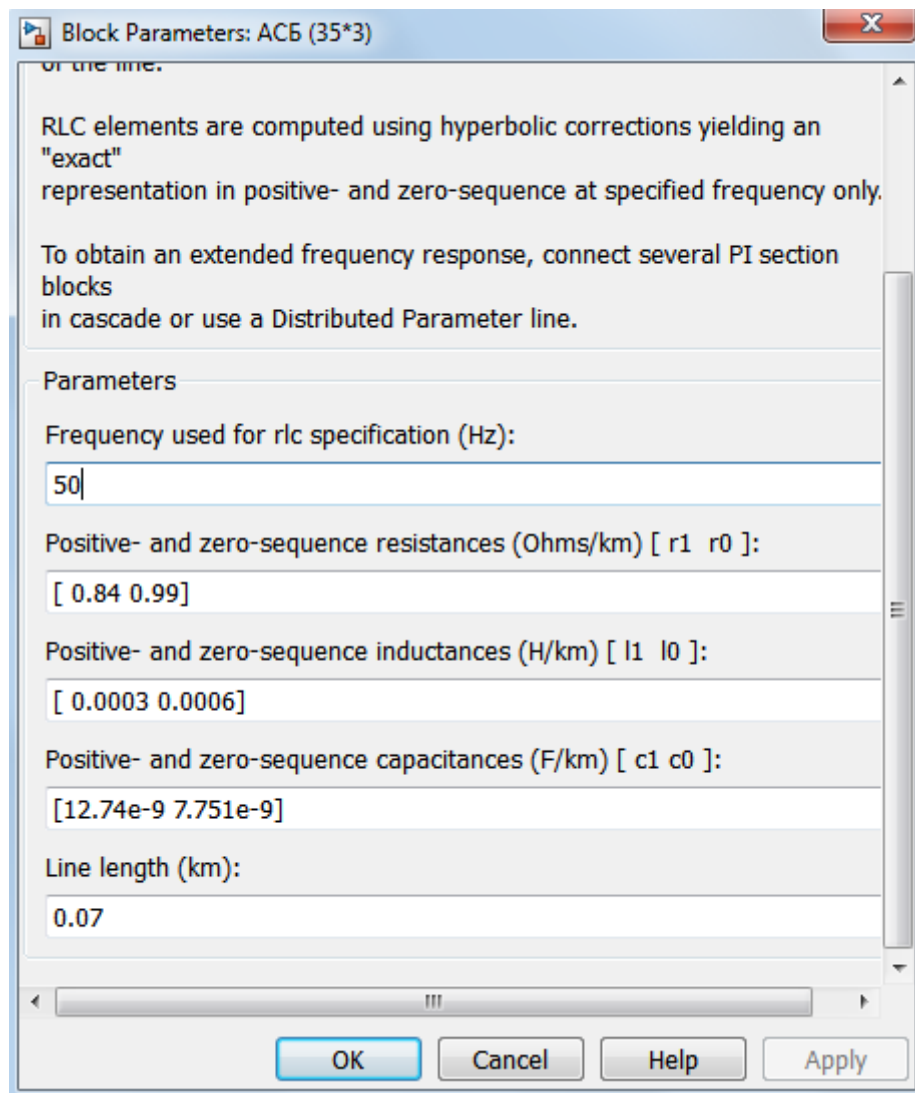


Рисунок 7.6 – Параметры кабельной линии АСБ (35\*3)

Исходные данные, которые нужно указать:

- Positive- and zero-resistances (Ohms/km) [r1 r0] – удельные сопротивления прямой и нулевой последовательности, Ом/км;
- Positive- and zero-inductances (H/km) [l1 l0] – удельное значение индуктивности прямой и нулевой последовательности, Гн/км;
- Line length (km) – длина линии, км;

Удельные параметры кабеля марки АСБ сечением 35 мм<sup>2</sup> [2]:

$$R_1 = 0,84 \frac{\text{Ом}}{\text{км}};$$

$$X_1 = 0,095 \frac{\text{Ом}}{\text{км}};$$

Индуктивность находится по формуле (19) , Гн/км:

$$L_1 = \frac{0,095}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0003$$

$$L_0 = 2 \cdot L_1 = 0,0006$$

### 7.3 Моделирование трехфазной последовательной нагрузки 3 Phase Series RLC Load

Блок 3Phase Series RLC Load моделирует трехфазную цепь, состоящую из трех последовательных RLC нагрузок. Схема соединения цепей может быть различной. Параметры цепи задаются через мощности фаз цепи при номинальном напряжении и частоте.

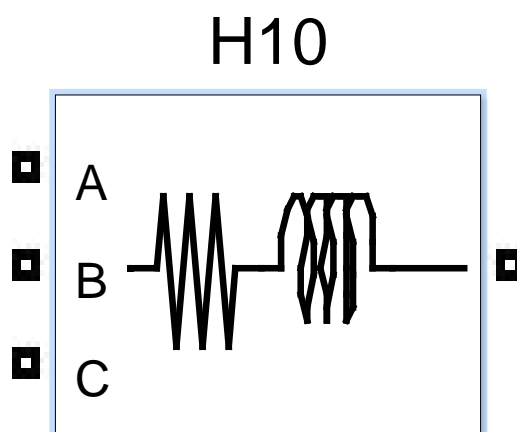


Рисунок 7.7 – Пиктограмма трехфазной нагрузки 3 Phase Series RLC Load

Таблица 7.1 – Ведомость контрольных замеров по ПС №45 «Емельяново» 110/35/10 кВ  
за 17 июня 2015 года.

Время замера	5-00		
Номер фидера	Ток, А	Показания счетчика	
		Акт.	Реакт.
Ф.45-5	50	011615,64	004222,19
Время замера	11-00		

Номер фидера	Ток, А	Показания счетчика	
		Акт.	Реакт.
Ф.45-5	50	011615,75	004222,29
Время замера	14-00		
Номер фидера	Ток, А	Показания счетчика	
		Акт.	Реакт.
Ф.45-5	50	011615,82	004222,35
Время замера	16-00		
Номер фидера	Ток, А	Показания счетчика	
		Акт.	Реакт.
Ф.45-5	50	011615,93	004222,39

Из этих данных можно высчитать коэффициент мощности  $\cos\varphi$ :

$$\cos\varphi = \frac{P_{\text{НОМ}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{P_{\text{НОМ}}^2 + Q_{\text{НОМ}}^2}}, \quad (20)$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{11615,64}{\sqrt{11615,64^2 + 4222,19^2}} \approx 0,94,$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{11615,75}{\sqrt{11615,75^2 + 4222,29^2}} \approx 0,94,$$

$$\cos\varphi_3 = \frac{11615,75}{\sqrt{11615,82^2 + 4222,35^2}} \approx 0,94,$$

$$\cos\varphi_4 = \frac{11615,93}{\sqrt{11615,93^2 + 4222,39^2}} \approx 0,94,$$

При определении нагрузок будем считать, что каждая КТП использует около 70% от номинальной мощности.

Расчет нагрузочной мощности, кВА:

$$S_{\text{расч}Hi} = 0,7 \cdot S_{\text{НОМ}} \quad (21)$$

$$S_{\text{расч}H1} = 0,7 \cdot 160 = 112,$$

$$S_{\text{расч}H2} = 0,7 \cdot 315 = 220,5,$$

$$S_{\text{расчН3}} = 0,7 \cdot 630 = 441,$$

$$S_{\text{расчН4}} = 0,7 \cdot 100 = 70,$$

$$S_{\text{расчН5}} = 0,7 \cdot 250 = 175,$$

$$S_{\text{расч6}} = 0,7 \cdot 400 = 280,$$

$$S_{\text{расч7}} = 0,7 \cdot 400 = 280,$$

$$S_{\text{расч8}} = 0,7 \cdot 100 = 70,$$

$$S_{\text{расчН9}} = 0,7 \cdot 630 = 441,$$

$$S_{\text{расчН10}} = 0,7 \cdot 63 = 44,1,$$

$$S_{\text{расчН11}} = 0,7 \cdot 63 = 44,1,$$

$$S_{\text{расчН12}} = 0,7 \cdot 100 = 70,$$

Зная коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , рассчитаем активные и реактивные мощности нагрузок:

Активные мощности нагрузок, кВт:

$$P_{\text{расчНi}} = S_{\text{расчНi}} \cdot \cos\varphi \quad (22)$$

$$P_{\text{расчН1}} = S_{\text{расчН1}} \cdot \cos\varphi = 112 \cdot 0,94 = 105,28,$$

$$P_{\text{расчН2}} = S_{\text{расчН2}} \cdot \cos\varphi = 220,5 \cdot 0,94 = 207,27,$$

$$P_{\text{расчН3}} = S_{\text{расчН3}} \cdot \cos\varphi = 441 \cdot 0,94 = 414,54,$$

$$P_{\text{расчН4}} = S_{\text{расчН4}} \cdot \cos\varphi = 70 \cdot 0,94 = 65,8,$$

$$P_{\text{расчН5}} = S_{\text{расчН5}} \cdot \cos\varphi = 175 \cdot 0,94 = 164,5,$$

$$P_{\text{расчН6}} = S_{\text{расчН6}} \cdot \cos\varphi = 280 \cdot 0,94 = 263,2,$$

$$P_{\text{расчН7}} = S_{\text{расчН7}} \cdot \cos\varphi = 280 \cdot 0,94 = 263,2,$$

$$P_{\text{расчН8}} = S_{\text{расчН8}} \cdot \cos\varphi = 70 \cdot 0,94 = 65,8,$$

$$P_{\text{расчН9}} = S_{\text{расчН9}} \cdot \cos\varphi = 441 \cdot 0,94 = 414,54,$$

Реактивные мощности нагрузок, квар:

$$Q_{\text{расч}Hi} = \sqrt{S_{\text{расч}Hi}^2 - P_{\text{расч}Hi}^2} \quad (23)$$

$$Q_{\text{расч}H1} = \sqrt{112^2 - 105,28^2} = 38,21,$$

$$Q_{\text{расч}H2} = \sqrt{220,5 - 207,27^2} = 75,23,$$

$$Q_{\text{расч}H3} = \sqrt{441^2 - 414,54^2} = 150,46,$$

$$Q_{\text{расч}H4} = \sqrt{70^2 - 65,8^2} = 23,88,$$

$$Q_{\text{расч}H5} = \sqrt{175 - 164,5^2} = 59,7,$$

$$Q_{\text{расч}H6} = \sqrt{280^2 - 263,2^2} = 95,53,$$

$$Q_{\text{расч}H7} = \sqrt{280^2 - 263,2^2} = 95,53,$$

$$Q_{\text{расч}H8} = \sqrt{70^2 - 65,8^2} = 23,88,$$

$$Q_{\text{расч}H9} = \sqrt{441^2 - 414,54^2} = 150,46,$$

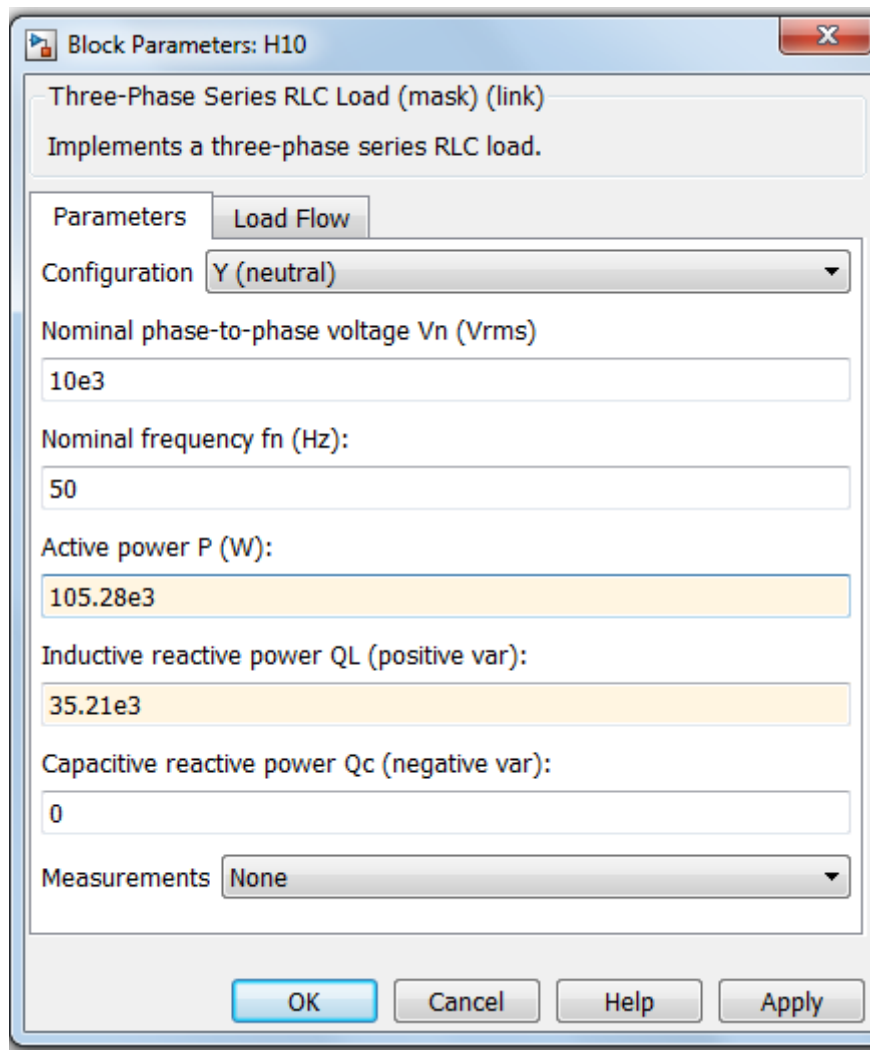


Рисунок 7.8 – Параметры трехфазной нагрузки 3 Phase Series RLC Load

*Configuration*: [Соединение]. Параметр задает схему соединения трехфазной цепи. Значение выбирается из списка:

- Y (grounded) – звезда с заземленной нейтралью,
- Y (floating) – звезда без нулевого провода,
- Y (neutral) – звезда с нулевым проводом,
- Delta – треугольник;

*Nominal phase\_phase voltage Vn (Vrms)*: [Номинальное линейное напряжение (В)]. Значение действующего линейного напряжения цепи, для которого определены мощности элементов;

*Nominal frequency fn (Hz)*: [Номинальная частота (Гц)]. Значение частоты, для которого определены мощности элементов;

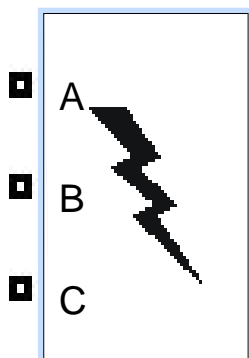
*Active power P (W)*: [Активная мощность на три фазы (Вт)];

*Inductive reactive power QL (positive var)*: [Реактивная мощность индуктивности на три фазы (ВАр)]. Потребляемая индуктивностью реактивная мощность.

*Capacitive reactive power QC (negative var)*: [Реактивная мощность емкости на три фазы (ВАр)]. Отдаваемая конденсатором реактивная мощность. В графе вводится абсолютное значение мощности (без учета знака).

## 7.4 Моделирование короткозамыкателя

Наиболее универсальным способом создания аварий является применение специального блока *3-Phase Fault* – блок для создания всех видов коротких замыканий в цепи. Пиктограмма блока показана на рисунке 7.9



Three-Phase Fault1

Рисунок 7.9 - Пиктограмма элемента *3-Phase Fault*

Этот блок включается поперечно цепи во все три фазы. Настройки позволяют задавать сопротивления замыкания в каждой фазе в отдельности и общее сопротивление заземляющего элемента. Выбрать какие фазы будут замкнуты между собой. Замыкание может производиться автоматически посредством установки времени срабатывания короткозамыкателя, либо же дистанционно при подаче логического сигнала на вход управления. Параметры для настройки блока приведены в диалоговом окне на рисунке 6.13.

Параметры блока:

- *Phase A Fault (Phase B Fault, Phase C Fault)* – установка фаз, участвующих в коротком замыкании. Если флаг на соответствующей фазе не установлен, то при подаче команды на замыкание, эта фаза остаётся незадействованной;
- *Fault resistance Ron* – сопротивление между каждой фазой и землей;
- *External control of fault timing* – внешнее управление моментом короткого замыкания. В случае установки флага, момент начала КЗ будет определяться внешним логическим сигналом, подаваемым на вход *com*. Если флаг не установлен, время начала КЗ будет задаваться в появившемся параметре
- *Transition times* в виде моментов времени, в которые должно происходить замыкание/размыкание. Вид операции определяется выбором параметра;
- *Transition status* состояние ключей, которое соответствует заданному моменту времени, заданному вектором *Transition times* ( 0 – разомкнутый ключ, 1 – замкнутый ключ). Параметр доступен при управлении блоком от встроенного таймера.

- *Snubbers resistance* – сопротивление в разомкнутом состоянии;
- *Snubbers capacitance* – ёмкость в разомкнутом состоянии;

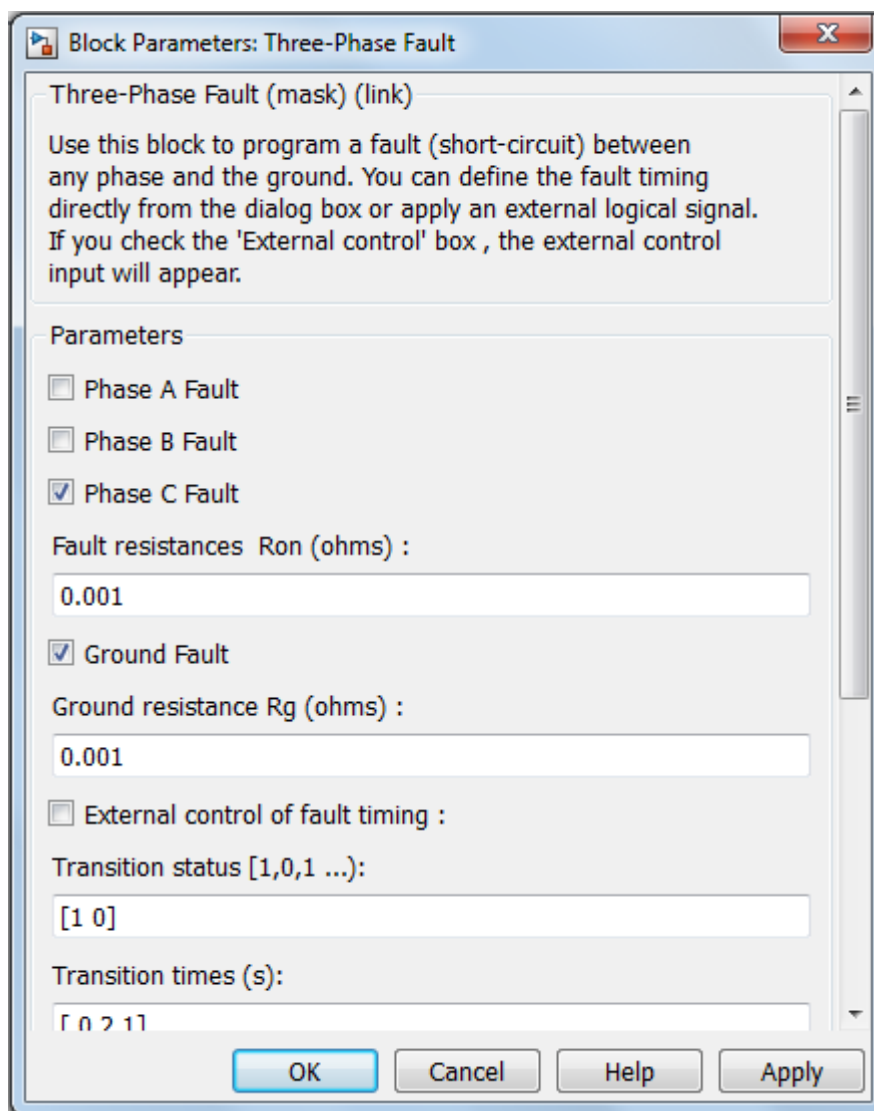


Рисунок 7.10– Параметры трехфазного короткозамыкателя

Зададим параметры блока:

- Фазы, участвующие в замыкании будем менять в зависимости от вида замеров.
- Сопротивление между фазой и землей примем равным 0.001
- Сопротивление в разомкнутом состоянии 1 МОм.
- Ёмкость в разомкнутом состоянии примем равной бесконечности.
- Время начала КЗ 0,2 секунды



## 8. Индикаторы повреждения линий электропередачи 6-35кВ

### Назначение и принцип работы

Индикаторы повреждения линий электропередачи (ИПВЛ) предназначены для определения пути прохождения тока короткого замыкания. Устройства рекомендуется устанавливать на отпайках линии электропередачи или через определённое расстояние, что позволяет определить поврежденную часть сети и сократить время поиска места короткого замыкания [10].



Рисунок 8.1 – Индикатор повреждения воздушных линий 6-35 кВ (ИПВЛ)

По своему принципу действия индикатор не срабатывает при набросах токов нагрузки, бросках тока намагничивания, внешних коротких замыканиях. При коротких замыканиях на контролируемом участке устройство реагирует на наброс тока более чем на 120 А с последующим спадом тока до нуля. По спаду тока до нуля отслеживается работа выключателя присоединения. При внешнем коротком замыкании происходит отключение поврежденного участка смежным выключателем, по линии сохранится протекание тока нагрузки, и устройство не срабатывает. При срабатывании индикатора активируется модуль светодиодной сигнализации на время, определяемое при заказе (6 или 12 часов).

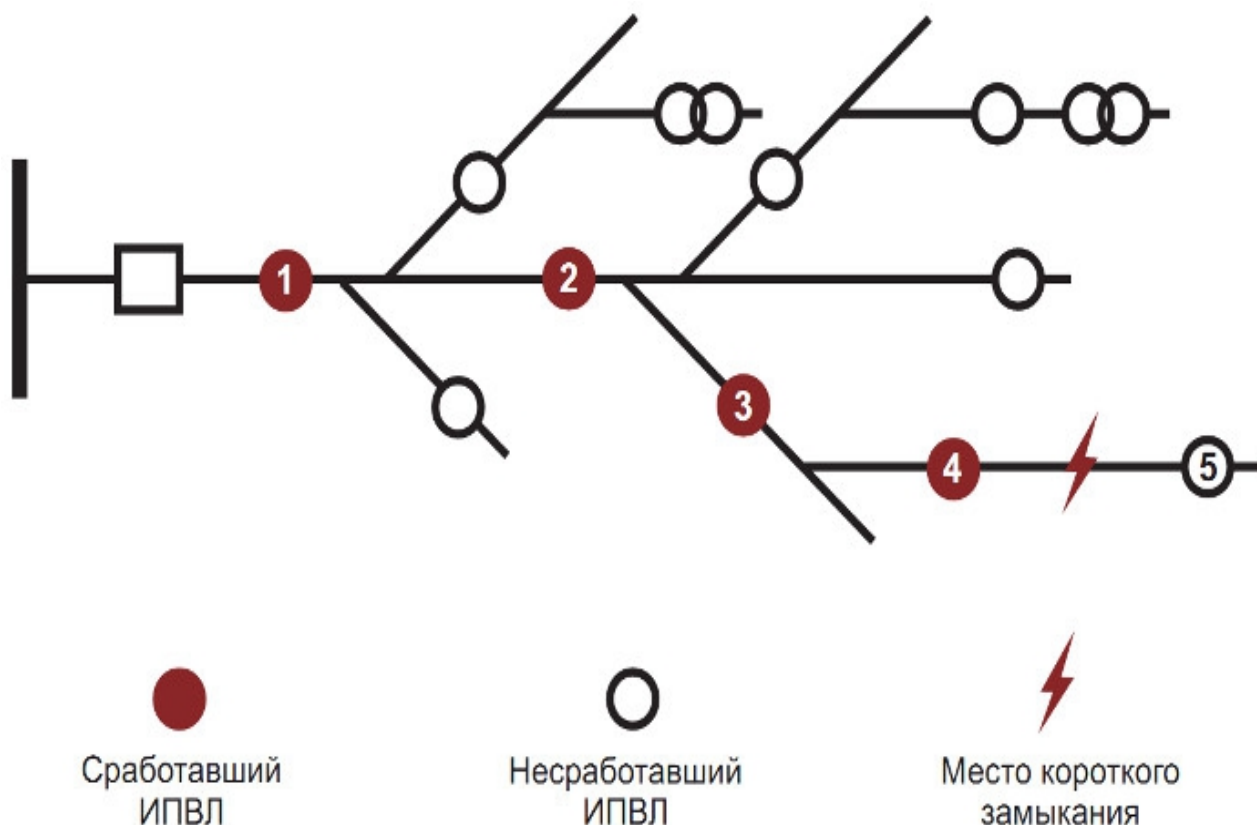


Рисунок 8.2 – Принцип работы ИПВЛ

#### Технические особенности

1. Установка и демонтаж устройств может производиться на линию под напряжением при помощи специализированного установочного комплекта.
2. Корпус индикаторов водонепроницаем, ударопрочен, механизм крепления к линии изготовлен из нержавеющей материалов.
3. Устройство осуществляет контроль состояния заряда батареи.
4. Питание устройства осуществляется от батарей с длительным сроком службы (батареи обеспечивают работу устройства в ждущем режиме до 8 лет).
5. ИПКЛ FI-3C1O-3 применяется на одножильных кабельных линиях диаметром от 8 до 65 мм.
6. Для передачи информации о срабатывании ИПКЛ подключается к индикаторной панели с помощью оптоволоконного кабеля.

Таблица 8.1 – Основные технические характеристики

	Описание	Диапазон
Условия эксплуатации	Диапазон рабочих температур	$-40^{\circ} \dots + 70^{\circ}$
	Относительная влажность	$\leq 100\%$
	Высота над уровнем моря	до 2000 м
Параметры линии электропередачи и системы	Линейное напряжение	$\leq 35$
	Частота	50 Гц, 60 Гц
	Режим работы нейтрали	Радиальная/Тупиковая
	Минимальный нагрузочный ток	0 А воздушная неизолированная линия 3 А кабель или изолированная линия
	Максимальный нагрузочный ток	До 630 А
	Влияние параллельной линии	10см/10кА
ИПВЛ	Минимальный наброс тока при КЗ/ОЗЗ	120 А/25А
	Максимальный допустимый ток	40кА/4 сек
	Индикация	3 мигающих светодиода, блинкер
	Время возврата	6ч, 12ч
	Видимость индикации	300 м днем/ 500 м ночью
	Масса	$\leq 0,5$ кг
	Механический ресурс блинкера	4000
	Частота радиосигнала	434 МГц
	Расстояние передачи	До 20 м

## 9. Система определения места повреждения ВЛ 6-35кВ

### Назначение и принцип работы:

Система определения места повреждения (ОМП) воздушных линий (ВЛ) предназначена для оперативного определения участка распределительной сети 6 – 35 кВ, на которой произошло короткое (КЗ) или однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). Система предназначена для работы в РС с односторонним питанием [11]. Ее структура приведена на рисунке 9.1

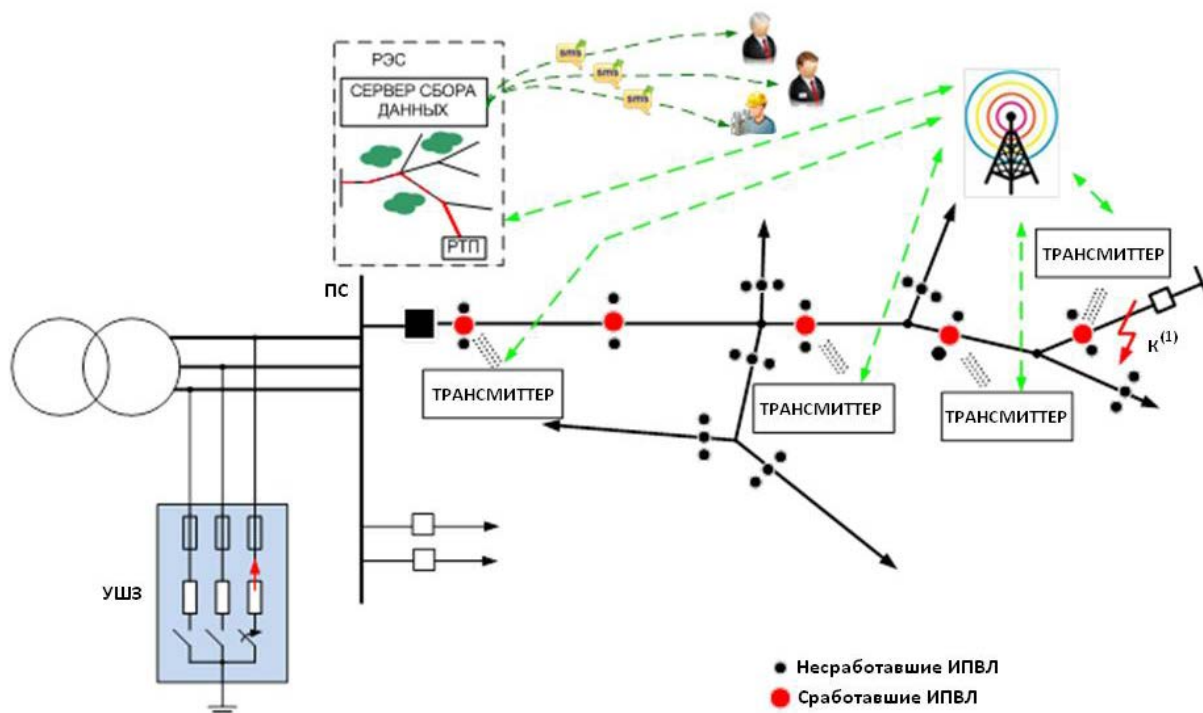


Рисунок 9.1 – Структура системы ОМП

В состав входят:

- индикаторы повреждения воздушных линий (ИПВЛ) с радиоканалом;
- устройство шунтирования замыкания (УШЗ);
- программный продукт топографического ОМП.

ИПВЛ устанавливаются через определенное расстояние непосредственно на провода ВЛ на развилках (отпайках), вдоль протяженных или на границах труднодоступных участков в трех фазах. Монтаж ИПВЛ может вестись без снятия напряжения ВЛ при помощи установочного комплекта. В свою очередь трансмиттеры монтируются на опору вблизи индикаторов. Питание трансмиттеров осуществляется от солнечной батареи. При своем срабатывании ИПВЛ связываются по радиоканалу на открытой для использования частоте и передают информацию о факте своего срабатывания в виде повреждения. Трансмиттер ретранслирует информацию в головной центр по GSM-каналу. Про-

грамма топографического ОМП обрабатывает поступающую информацию, отображает поврежденный участок на карте с привязкой к карте местности и осуществляет оперативное оповещение персонала посредством SMS и E-MAIL рассылки.

По своему принципу действия индикатор не срабатывает при набросах токов нагрузки, бросках тока намагничивания, внешних коротких замыканиях. ИПВЛ различает КЗ и ОЗЗ. В режиме КЗ на контролируемом участке фиксируется наброс тока 120 А с его последующим спадом до нуля (отключения повреждения). В свою очередь при внешнем КЗ происходит отключение поврежденного участка смежным выключателем, а по линии сохраняется протекание тока нагрузки, и по этой причине ИПВЛ не срабатывает.

УШЗ обеспечивает работу ИПВЛ в режиме ОЗЗ. УШЗ устанавливается на шинах подстанции. При возникновении ОЗЗ (по факту появления напряжения нулевой последовательности) УШЗ кратковременно подключает резистор, тем самым увеличивая ток в поврежденной фазе на 30-40 А, что приводит к срабатыванию ИПВЛ.

Таблица 9.1 – Основные технические характеристики

	Описание	Диапазон
Эксплуатация	Диапазон рабочих температур	$-40^{\circ} \dots + 70^{\circ}$
Параметры линии электропередачи и системы	Линейное напряжение	$\leq 35$
	Режим работы нейтрали	Радиальная/Тупиковая
	Минимальный нагрузочный ток	0 А воздушная неизолированная линия 2 А кабель или изолированная линия
	Диаметр провода	6 – 32 мм
ИПВЛ	Минимальный наброс тока при КЗ/ОЗЗ	120 А/25А
	Максимальный допустимый ток	40кА/4 сек
	Индикация	3 мигающих светодиода, блинкер
	Время возврата	6ч, 12ч
	Видимость индикации	300 м днем/ 500 м ночью
	Масса	$\leq 0,5$ кг
	Механический ресурс блинкера	4000
	Частота радиосигнала	434 МГц
	Расстояние передачи	До 20 м

Трансмиттер	Масса	4,5 кг
	Длительность светового дня	> 4,5 часа
	GSM модем	E-GSM
	АКБ, Ресурс без подзарядки	12В/2,5 ч, 15 дней

Из работы удалены текст и графические материалы, содержащие производственные и технические сведения, а также результаты интеллектуальной деятельности.

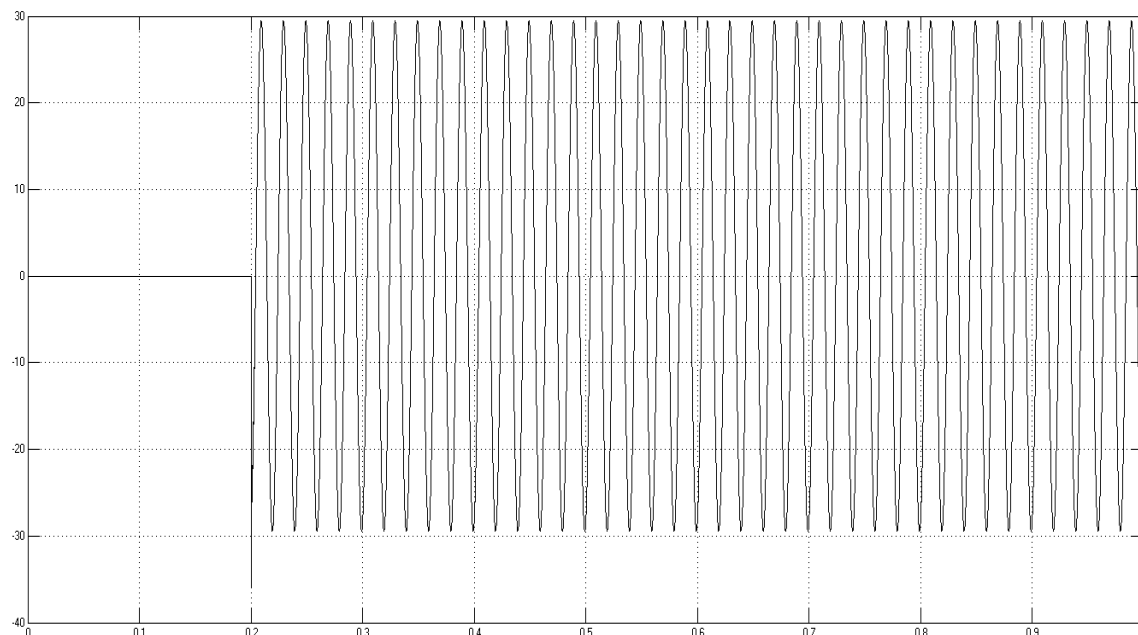


Рисунок 10.3– осциллограмма тока в фазе С

На рисунке 10.3 показан ток в фазе С до однофазного замыкания на землю (временной промежуток от 0 до 0,2 сек) и при замыкании на землю (от 0,2 до 1 сек). При этом в нормальном режиме ток приблизительно равен 0, а в момент замыкания достигает требуемого уровня для срабатывания ИПВЛ.

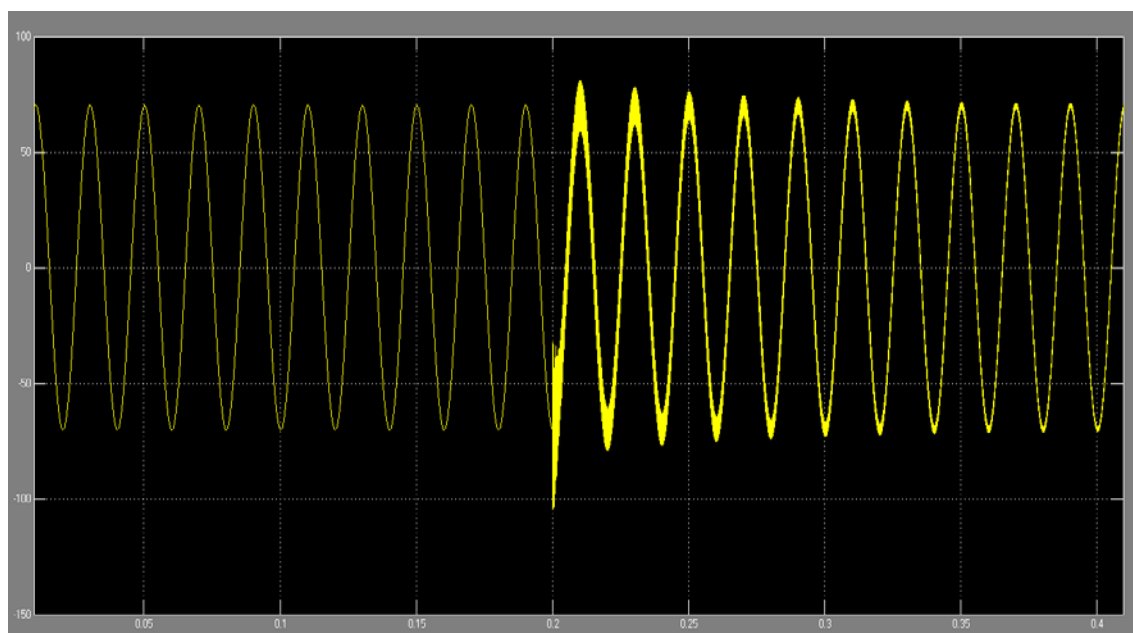
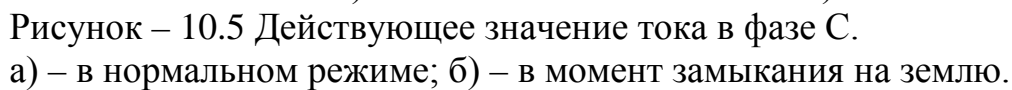


Рисунок 10.4 – Осциллограмма тока в фазе С без подключения УШЗ

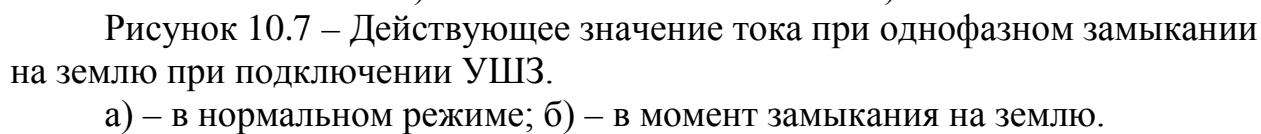
На рисунке 10.4 показано амплитудное значение тока в фазе С в нормальном режиме (от 0 до 0,2 сек) и при однофазном замыкании на землю (от 0,2 до 0,4 сек). Действующее значение тока в фазе С в нормальном режиме и в момент замыкания на землю показано на рисунке 999





The graph displays a sinusoidal wave on a coordinate plane. The x-axis ranges from 0 to 0.4 with major ticks every 0.05 units. The y-axis ranges from -150 to 150 with major ticks every 50 units. A dashed grid is present. The wave is plotted in blue. It starts at (0, 50), has an amplitude of approximately 50 until x=0.2, where it abruptly increases to an amplitude of approximately 100. The wave continues with this larger amplitude until x=0.4, where it ends at y=50.

Рисунок 10.6 – Осциллограмма тока в фазе С при подключении УШЗ



При двухфазном КЗ (фазы В и С) наблюдается многократное увеличение тока по отношению к номинальному.

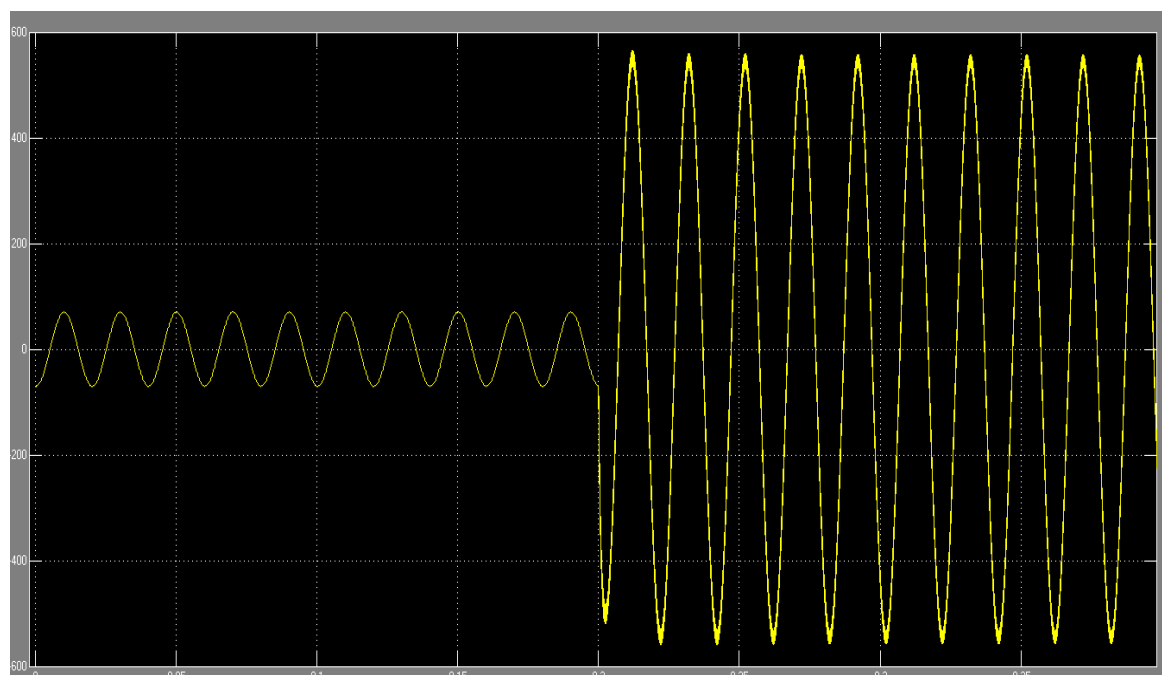
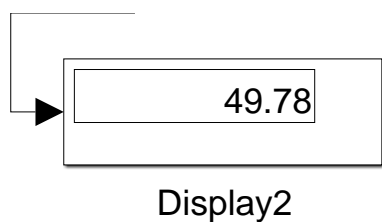
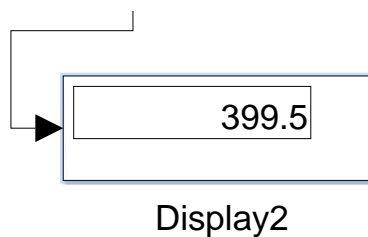


Рисунок 10.8 – Осциллограмма двухфазного КЗ фаз В и С.



а)



б)

Рисунок 10.9 – Действующее значение тока при двухфазном КЗ фаз В и С.  
а) – в нормальном режиме; б) – в момент замыкания на землю.

При двухфазном КЗ на землю также наблюдается многократное увеличение тока по отношению к току нормального режима.

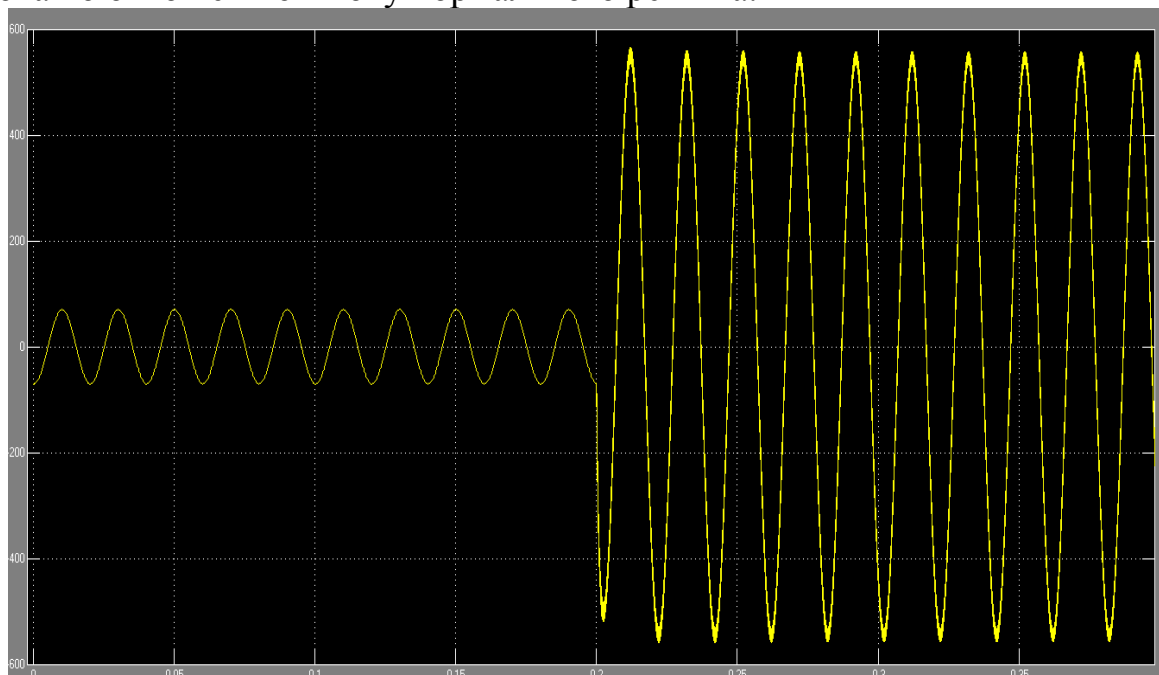


Рисунок 10.10 – Осциллограмма двухфазного КЗ на землю фаз В и С.

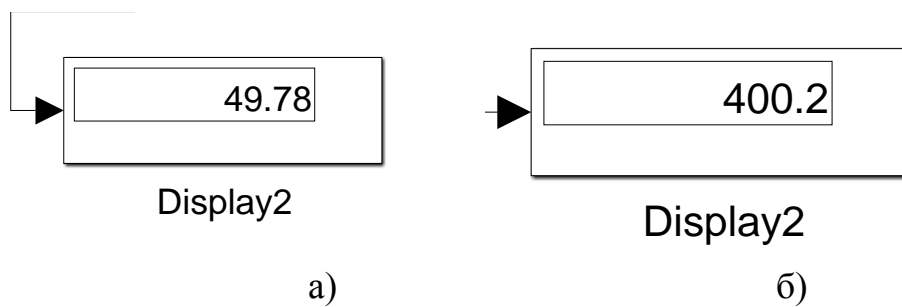


Рисунок 10.11 – Действующее значение тока при двухфазном КЗ на землю фаз В и С.

а) – в нормальном режиме; б) – в момент замыкания на землю.

## 11. Моделирование индикатора повреждения воздушной линии

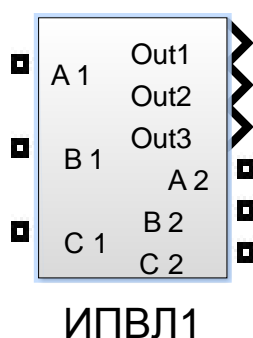


Рисунок 11.1– пиктограмма индикатора повреждения воздушной линии (ИПВЛ)

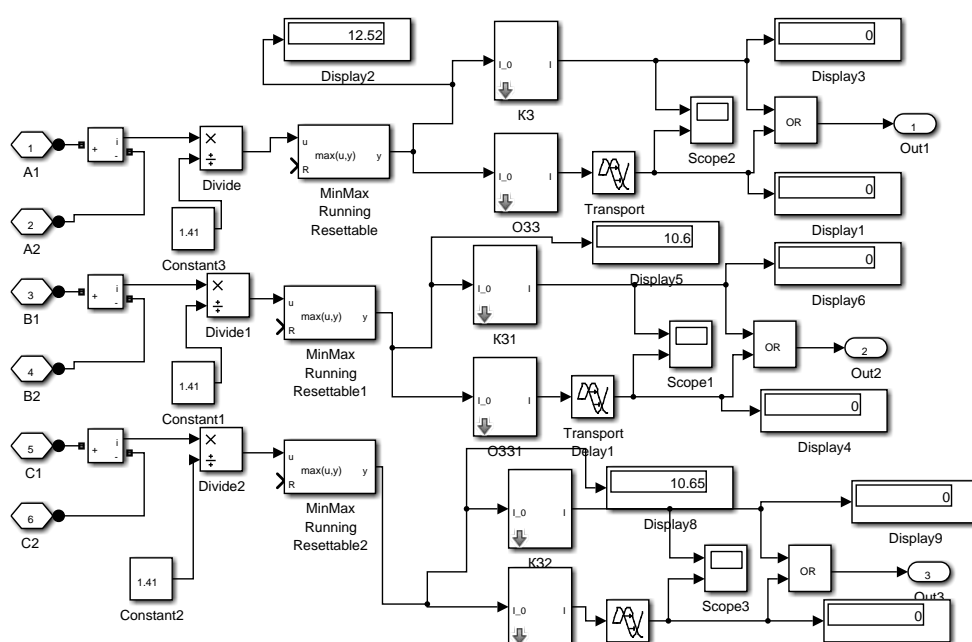


Рисунок 11.2 – Схема работы ИПВЛ

На вход A1 поступает значение переменного амплитудное значение тока. Оно поступает на вход измерительного элемента «Current Measure». Далее поступает на блок делителя «Divide». В этом блоке амплитудное значение делится на константу со значением  $1,41 \approx \sqrt{2}$ , таким образом получается действующее значение переменного тока. После этого действующее значение тока поступает на блок «MinMax Running Resettable». Этот блок предназначен для регистрации максимального значения, после чего ток поступает на блоки «K3», «O33» и на дисплей, где отображается действующее значение тока. В блоке «K3» предусмотрена уставка, которая подбирается таким образом, чтобы обеспечить срабатывание при увеличении тока более чем на 120 А. В блоке «O33» увеличение тока составляет 25 А, срабатывание происходит через выдержку времени, которую обеспечивает блок «Transport delay». Работу индикации с блоков «K3» или «O33» можно отслеживать на осциллографе.

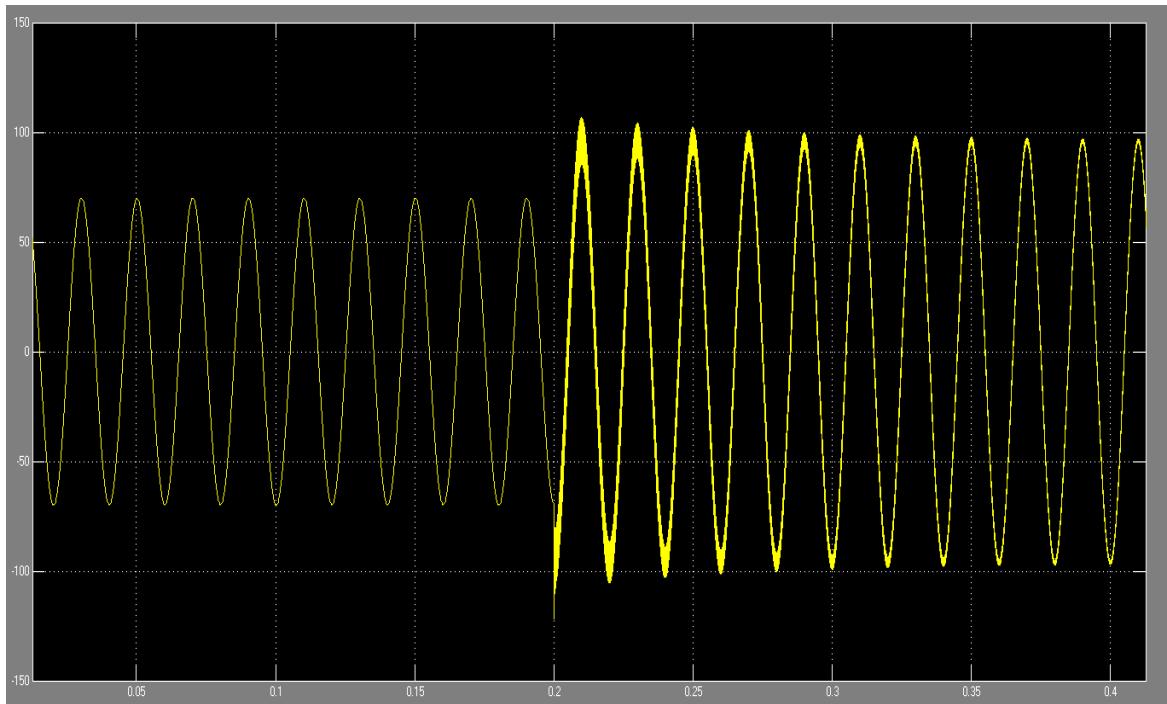


Рисунок 11.3 – Осциллограмма ОЗЗ в фазе С при подключении УШЗ

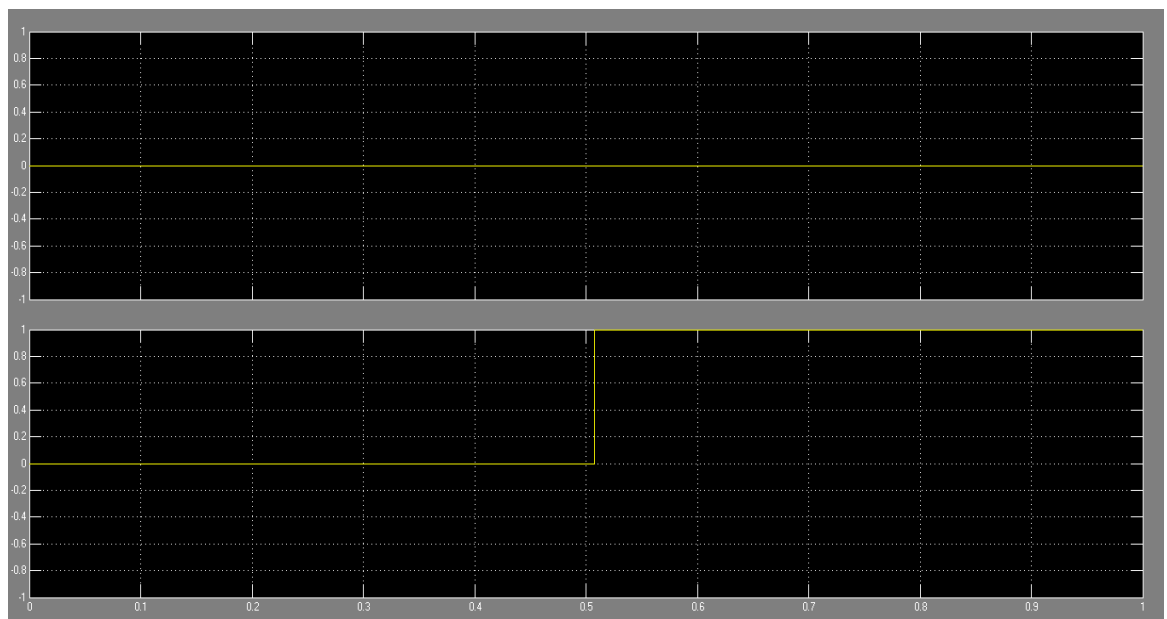


Рисунок 11.4 – Переключение ИПВЛ в режим детектирования при ОЗЗ.

После срабатывания одного из блоков сигнал поступает на блок «OR», который работает как логический элемент «ИЛИ». При этом можно наблюдать на дисплее работу блоков «КЗ» или «ОЗЗ». При переключении на дисплее появляется «1». Этот сигнал поступает на выход «OUT»

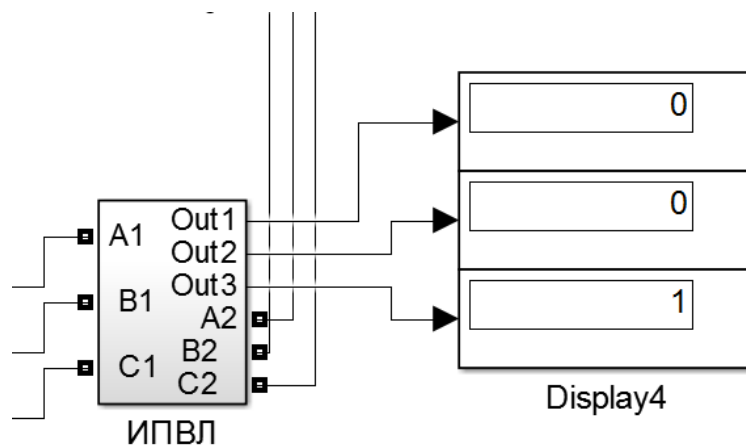


Рисунок 11.5 – Срабатывание индикатора в фазе С

При двухфазном КЗ фаз В и С срабатывание индикаторов происходит мгновенно. В этом случае подключение УШЗ не нужно так как ток КЗ многократно превосходит номинальный ток.

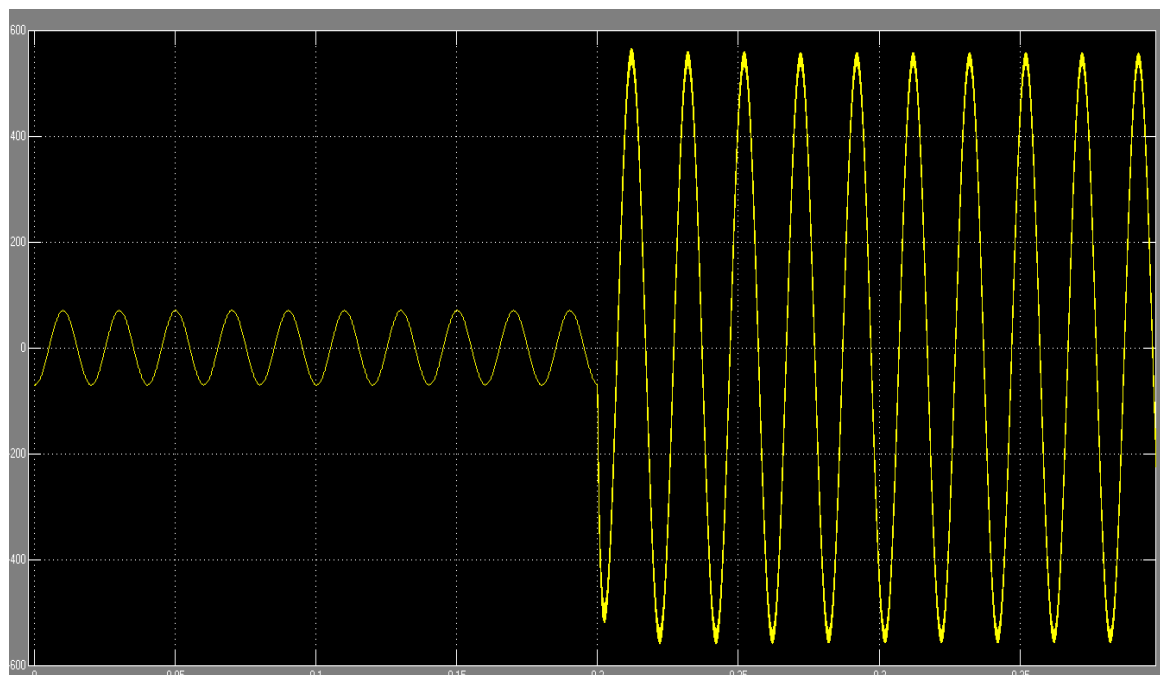


Рисунок 11.6– двухфазное КЗ в фазах В и С

На рисунке 11.7 показано срабатывание ИПВЛ фазы С, осциллограмма фазы В идентична фазе С

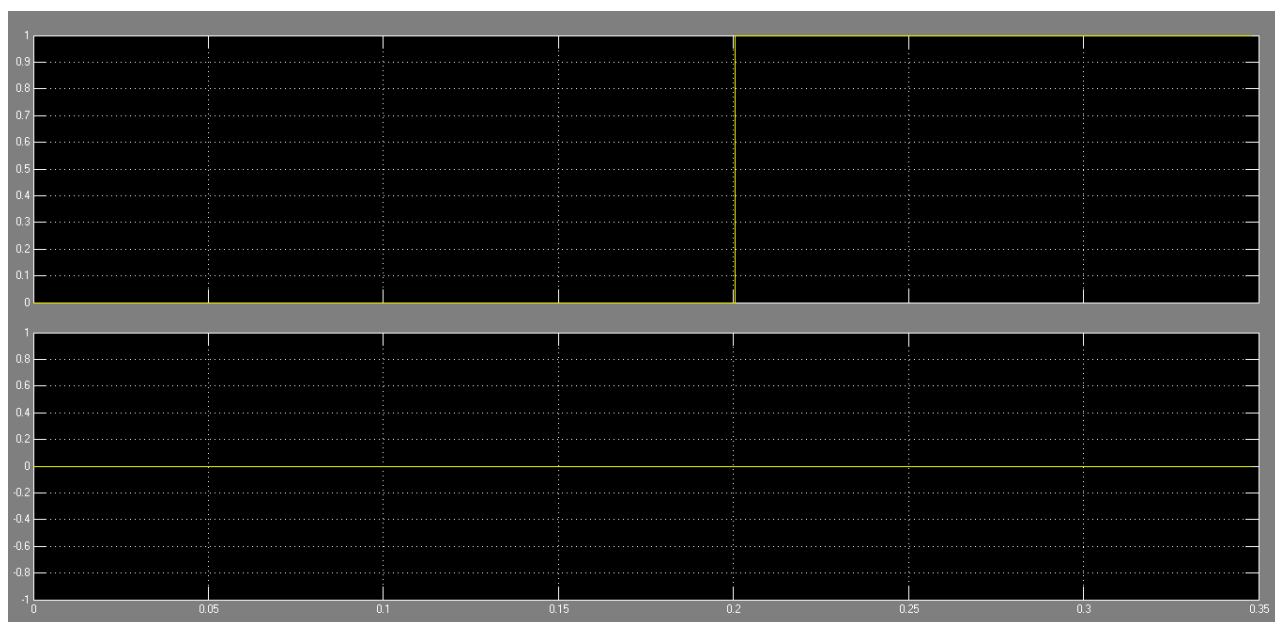


Рисунок 11.7– Переключение ИПВЛ в режим детектирования КЗ

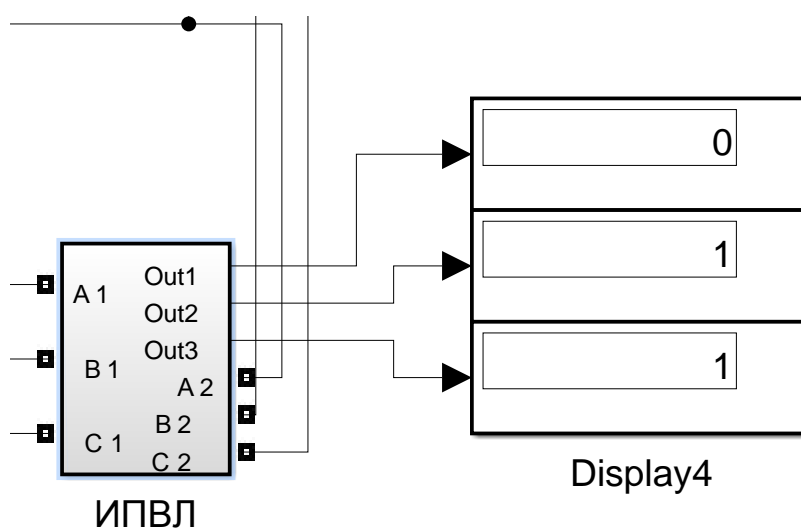


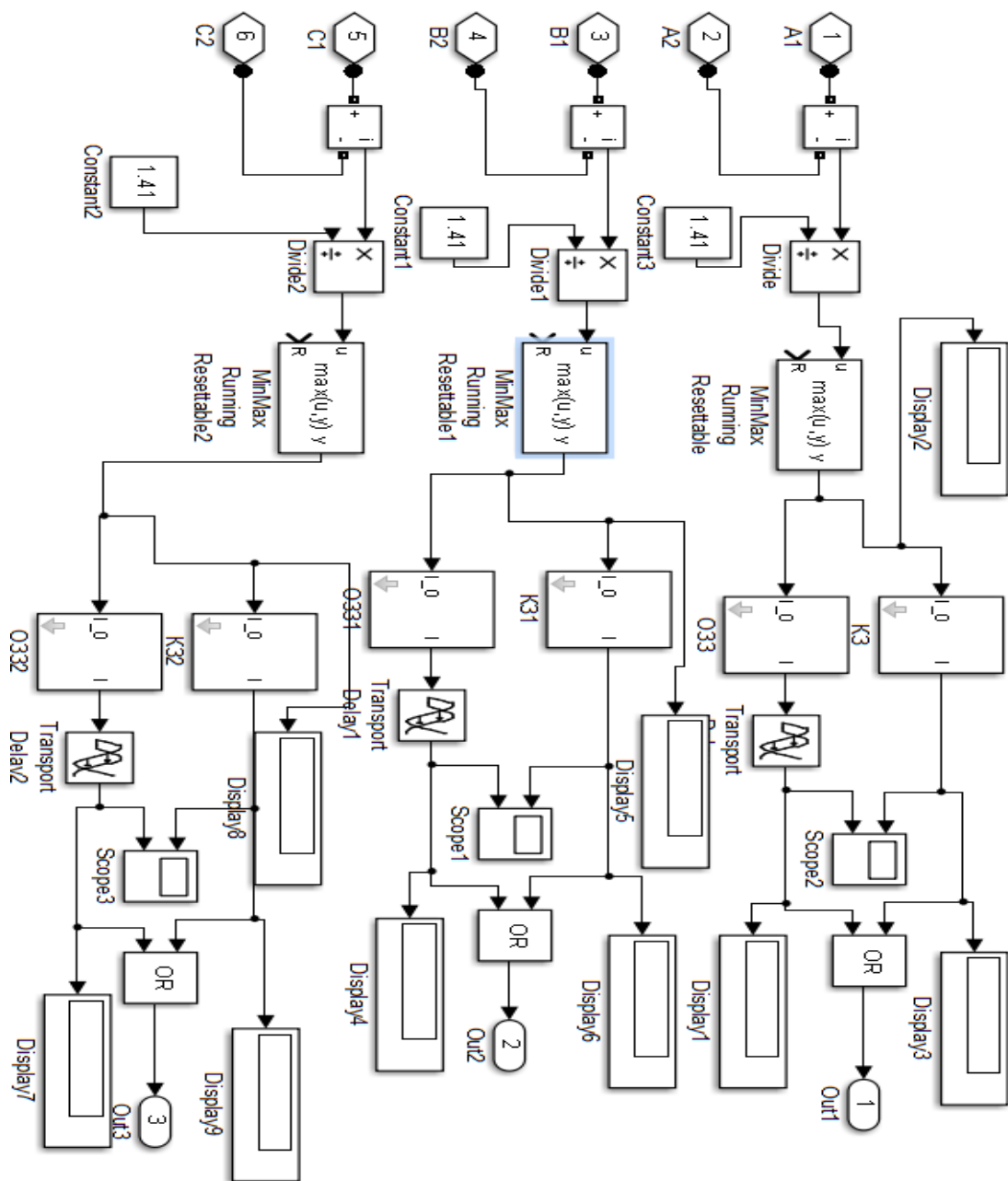
Рисунок 11.8 – Срабатывание индикаторов в фазе В и С

## Список использованных источников

1. Электронный каталог [www.transform.ru](http://www.transform.ru) [Электронный ресурс]: электроустановки выше 1 кВ в сетях с изолированной нейтралью (с малыми токами замыкания на землю). —Режим доступа: [http://www.transform.ru/sst/\\$rules/pue/gl1.7.htm](http://www.transform.ru/sst/$rules/pue/gl1.7.htm) — Загл. с экрана.
2. Электронный каталог [www.forca.ru](http://www.forca.ru) [Электронный ресурс]: Активные и реактивные сопротивления кабелей. —Режим доступа: <http://forca.ru/spravka/spravka/aktivnye-i-reaktivnye-soprotivleniya-kabeley.html>— Загл. с экрана.
3. Электронный каталог [www.elec.ru](http://www.elec.ru) [Электронный ресурс]: Правила устройства электроустановок. Издание—Режим доступа: <http://www.elec.ru/library/direction/pue.html>— Загл. с экрана.
4. Электронный каталог [www.energy-ua.com](http://www.energy-ua.com) [Электронный ресурс]: Защита от однофазных замыканий на землю. —Режим доступа: <http://energy-ua.com/releynaya-zashch/zashchita-ot-odn.html>— Загл. с экрана.
5. Электронный каталог [www.helpiks.org](http://www.helpiks.org) [Электронный ресурс]: Фильтры токов нулевой последовательности. —Режим доступа: <http://helpiks.org/1-27035.html>— Загл. с экрана.
6. Электронный каталог [www.electromechanics.ru](http://www.electromechanics.ru) [Электронный ресурс]: Разомкнутый треугольник. Открытый треугольник. —Режим доступа: <http://www.electromechanics.ru/electrical-engineering/special-issues/514-open-delta-open-triangle.html>— Загл. с экрана.
7. Электронный каталог [www.rza.org.ua](http://www.rza.org.ua) [Электронный ресурс]: Фильтры симметричных составляющих. —Режим доступа: [http://rza.org.ua/rza/read/6-7--Filtri-simmetrichnih-sostavlyayushchih\\_37.html](http://rza.org.ua/rza/read/6-7--Filtri-simmetrichnih-sostavlyayushchih_37.html)— Загл. с экрана.
8. Электронный каталог [www.forca.ru](http://www.forca.ru) [Электронный ресурс]: Ликвидация аварий при замыкании на землю - Инструкция по предотвращению и ликвидации аварий в электрической части энергосистем—Режим доступа: [http://forca.ru/instrukcii/dispatcherskie/instrukciya-po--predotvrascheniyu-i-likvidacii-avarii-v-elektricheskoi-chasti-energосистем\\_5.html](http://forca.ru/instrukcii/dispatcherskie/instrukciya-po--predotvrascheniyu-i-likvidacii-avarii-v-elektricheskoi-chasti-energосистем_5.html)— Загл. с экрана.
9. Электронный каталог [www.forca.ru](http://www.forca.ru) [Электронный ресурс]: Инструкция по отысканию "земли" в сети 3-6-10-35кВ—Режим доступа: <http://forca.ru/instrukcii/dispatcherskie/instrukciya-po-otyskaniyu-zemli-v-seti-3-6-10-35kv.html>— Загл. с экрана.
10. Электронный каталог [www.ic-bresler.ru](http://www.ic-bresler.ru) [Электронный ресурс]: Индикатор повреждения воздушной линии (ИПВЛ). —Режим доступа: FI-3A1F [http://www.ic-bresler.ru/produkty/6-35\\_kv/indikator\\_povrejdeniya\\_vozdushnoy\\_linii\\_fi-3a1f/](http://www.ic-bresler.ru/produkty/6-35_kv/indikator_povrejdeniya_vozdushnoy_linii_fi-3a1f/)— Загл. с экрана.
11. Электронный каталог [www.ic-bresler.ru](http://www.ic-bresler.ru) [Электронный ресурс]: Геоинформационная система (ГИС) определения места повреждения (ОМП) 6-35 кВ. —Режим доступа: [http://www.ic-bresler.ru/produkty/6-35\\_kv/sistema\\_omp\\_6-35\\_kv/](http://www.ic-bresler.ru/produkty/6-35_kv/sistema_omp_6-35_kv/)— Загл. с экрана.



12. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с., ил. (Серия «Проектирование»).
13. СТО 4.2-07-2010 Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной и научной деятельности. - Взамен СТО 4.2-07-2014; дата введ. 22.11.2010. - Красноярск: БИК СФУ. - 57 с.
14. Коковин В.Е. Фильтры симметричных составляющих в релейной защите. М., «Энергия», 1968
15. Электронный каталог [www.helpiks.org](http://www.helpiks.org) [Электронный ресурс]: Индуктивное сопротивление—Режим доступа: <http://helpiks.org/5-27932.html>— Загл. с экрана.



БР – 13.03.02.03

Структурная  
схема ИПВЛ

Лит.	Масса	Масштаб
		1:1
Лист 2		Листов 3

Кафедра ЭСиЭЭС

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Д.А.Любезных		
Пров.		А.В.Малеев		
Т.контр.				
Н.контр.		И.В.Коваленко		
Утв.		И.В.Коваленко		